

# **PROJECTO DE EXECUÇÃO DE UM NÓ DE LIGAÇÃO EM TROMPETE NAS ESPECIALIDADES DE GEOMETRIA DO TRAÇADO E PAVIMENTAÇÃO**

## **Volume I - Geometria do Traçado**

**JOÃO PEDRO CAMELO FRAGATA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO**

---

Orientador: Professor Doutor Adalberto Quelhas da Silva França

MARÇO DE 2008

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miiec@fe.up.pt](mailto:miiec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Pais





## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor Adalberto França pelos seus ensinamentos, orientações e disponibilidade demonstradas, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus colegas e amigos pela motivação, simpatia e amizade demonstradas.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, que me incentivaram, apoiaram e me deram a oportunidade de realizar este trabalho de conclusão de curso.



## **RESUMO**

O presente trabalho visa sobretudo o estudo de um Nó de Ligação na especialidade de Geometria do Traçado. De forma a dar não só uma visão prática para um Projecto de Execução de um Nó de Ligação, e também por opção do orientador e do gosto do autor pelas questões de Geometria do Traçado, o seguinte trabalho não se restringe apenas ao objectivo inicialmente proposto. Nele é incluído um repositório de todos os conceitos teóricos adquiridos nas disciplinas de Vias de Comunicação I, Vias de Comunicação II e Complementos de Estradas e Aeródromos no domínio de Geometria do Traçado. Como consequência de ser um trabalho de fim de curso, procurou-se ainda organizar a informação contida nos manuais que abordam este tema e fornecer uma explicação para os critérios preconizados pelas Normas Portuguesas. Assim, para facilitar a compreensão dos assuntos a abordar, desenvolveu-se uma explicação teórica para cada um deles, recorrendo-se ao auxílio de esquemas e imagens para clarificar os conceitos utilizados.

Esta elaboração sobre assuntos teóricos fundamenta as diversas etapas que são necessárias para a concretização do Projecto de Execução de um Nó em Trompete na área de Geometria do Traçado, sendo este o caso de estudo do presente trabalho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Nó de Ligação, Trompete, Geometria do Traçado, Repositório, Projecto



## **ABSTRACT**

The main goal of the following work is to study a Trumpet Interchange in the specific area of Design Geometry. In order to provide not only a practical vision for an Implementation Project of a Trumpet Interchange, the coordinator and the author decided to reach other goals besides the objective originally proposed. Therefore, it was included several theoretical concepts acquired in the disciplines of Vias de Comunicação I, Vias de Comunicação II and Complementos de Estradas e Aeródromos in the area of Design Geometry. As a consequence of being a final work of degree, it was organized all the information in the manuals related with this issue for an explanation of the Portuguese Standards. Thus, for an easier understanding of the main issues, it was developed a theoretical explanation for each one of them by using diagrams and pictures to clarify the concepts.

This work based on theoretical issues gives the different steps that are necessary for the Implementation Project of a Trumpet Interchange in the area of Design Geometry which is the case of study for the following work.

**KEYWORDS:** Interchange, Trumpet, Design Geometry, Compilation, Project



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
 <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	 <b>1</b>
 <b>2. ELEMENTOS NECESSÁRIOS PARA UM PROJECTO DE UM NÓ DE LIGAÇÃO .....</b>	 <b>3</b>
<b>2.1. GENERALIDADES .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. TRÁFEGO .....</b>	<b>3</b>
2.2.1. VELOCIDADE.....	4
2.2.2. FAIXA DE RODAGEM.....	4
<b>2.3. SEGURANÇA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.4. MEIO AMBIENTE.....</b>	<b>4</b>
 <b>3. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS PARA A CONCEPÇÃO DE UM NÓ DE LIGAÇÃO .....</b>	 <b>5</b>
<b>3.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS EM PLANTA .....</b>	<b>5</b>
3.1.1. RAIOS E VELOCIDADE ESPECÍFICA .....	5
3.1.2. CURVAS CIRCULARES .....	8
3.1.3. CURVAS DE TRANSIÇÃO .....	8
3.1.3.1. Critérios para o dimensionamento de clotóides .....	8
3.1.3.2. Condicionantes para a aplicação das curvas de transição .....	13
3.1.4. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS RAMOS DE LIGAÇÃO .....	15
3.1.4.1. Parâmetros geométricos .....	15
3.1.4.2. Distância de visibilidade .....	17
3.1.4.3. Largura e número de vias dos ramos de ligação .....	19
3.1.4.4. Sobreelevação dos ramos de ligação .....	21
3.1.4.5. Sobrelargura dos ramos de ligação .....	23
3.1.5. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA ESTRADA PRINCIPAL .....	23
3.1.5.1. Vias de abrandamento e aceleração .....	23
3.1.5.2. Construção do “taper” .....	28

3.1.5.3. Disfarce de sobrelevação .....	32
<b>3.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS EM PERFIL LONGITUDINAL .....</b>	<b>39</b>
3.2.1. TRAINÉIS .....	40
3.2.1.1. Inclinação máxima .....	40
3.2.1.2. Inclinação mínima .....	40
3.2.2. CONCORDÂNCIAS VERTICAIS .....	41
3.2.2.1. Concordâncias convexas .....	43
3.2.2.2. Concordâncias côncavas .....	46
3.2.3. COTAS DO PROJECTO .....	48
3.2.3.1. Em trainel.....	48
3.2.3.2. Em concordância .....	49
<b>4. PROJECTO DE EXECUÇÃO DE UM NÓ DE LIGAÇÃO EM TROMPETE.....</b>	<b>53</b>
<b>4.1. PREÂMBULO .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2. CONCEPÇÃO GERAL.....</b>	<b>53</b>
<b>4.3. CONDICIONANTES DO PROJECTO .....</b>	<b>55</b>
4.3.1. LIGAÇÕES À REDE LOCAL .....	55
4.3.2. OBRA DE ARTE .....	56
4.3.3. NÚMERO DE VIAS .....	56
<b>4.4. TRAÇADO EM PLANTA .....</b>	<b>57</b>
4.4.1. ESTRADA PRINCIPAL .....	57
4.4.1.1. Velocidade específica.....	57
4.4.1.2. Largura da faixa de rodagem .....	57
4.4.1.3. Separadores .....	58
4.4.1.4. Elementos característicos da directriz.....	58
4.4.2. PARTICULARIDADES TEÓRICAS DOS RAMOS .....	58
4.4.2.1. Situação 1- “Loop” entre recta e clotóide - Ramo B .....	59
4.4.2.2. Situação 2 - Curva em “S” e clotóide de saída tangente a um alinhamento recto – Ramo A e Ramo C.....	61
4.4.2.3. Situação 3 - Curva ovóide e Curva em “S”- Ramo D: .....	62
4.4.3. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DOS RAMOS.....	63
4.4.3.1. Ramo B.....	65
4.4.3.2. Ramo A.....	69



4.4.3.3. Ramo A+B .....	73
4.4.3.4. Ramo C .....	77
4.4.3.5. Ramo D .....	81
<b>4.5. TRAÇADO EM PERFIL LONGITUDINAL.....</b>	<b>85</b>
4.5.1. ESTRADA PRINCIPAL .....	85
4.5.1.1. Faixa interior (intradorso) .....	85
4.5.1.2. Faixa exterior (extradorso) .....	85
4.5.1.3. Elementos característicos da rasante .....	87
4.5.2. PARTICULARIDADES TEÓRICAS DOS RAMOS .....	89
4.5.2.1. Concordâncias.....	90
4.5.2.2. Trainéis.....	90
4.5.3. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DOS RAMOS .....	91
4.5.3.1. Ramo B.....	91
4.5.3.2. Ramo A.....	95
4.5.3.3. Ramo A+B .....	97
4.5.3.4. Ramo C .....	103
4.5.3.5. Ramo D .....	107
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>115</b>
<b>A.1 – DEFINIÇÃO NUMÉRICA DO TRAÇADO EM PLANTA .....</b>	<b>117</b>
A.1.1 - ESTRADA PRINCIPAL.....	119
A.1.2 - RAMO B .....	121
A.1.3 - RAMO A .....	123
A.1.4 - RAMO A+B .....	125
A.1.5 - RAMO C .....	131
A.1.6 - RAMO D.....	133
<b>A.2 – DEFINIÇÃO NUMÉRICA DO TRAÇADO EM PERFIL LONGITUDINAL.....</b>	<b>135</b>
A.2.1 - ESTRADA PRINCIPAL.....	137
A.2.2 - RAMO B .....	139

A.2.3 - RAMO A .....	143
A.2.4 - RAMO A+B.....	145
A.2.5 - RAMO C .....	149
A.2.6 - RAMO D .....	153

### **A.3 – PEÇAS DESENHADAS**

DESENHO Nº1 – PLANTA DE IMPLANTAÇÃO

DESENHO Nº2.1 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – ESTRADA PRINCIPAL

DESENHO Nº2.2 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – RAMO B

DESENHO Nº2.3 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – RAMO A

DESENHO Nº2.4 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – RAMO A+B

DESENHO Nº2.5 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – RAMO C

DESENHO Nº2.6 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – RAMO D

DESENHO Nº3.1 – PORMENOR DO SEPARADOR DO TIPO FLEXÍVEL

DESENHO Nº3.2 – PORMENOR DO SEPARADOR DO TIPO RÍGIDO

DESENHO Nº3.3 – PORMENOR DA VALETA LATERAL DA ESTRADA PRINCIPAL

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1– Esquema de forças a actuar num veículo ao descrever uma curva circular de inclinação transversal $\alpha$ .....	6
Fig.2– Esquema de forças a actuar num veículo ao descrever uma curva circular de inclinação transversal $\alpha$ .....	9
Fig.3- Inclinação relativa dos bordos da faixa de rodagem. ....	10
Fig.4- Relação entre os parâmetros das clotóides entre dois alinhamentos rectos e uma curva circular. ....	14
Fig.5- Relação entre os parâmetros das clotóides entre duas curvas circulares de sentido contrário. ....	14
Fig.6- Parâmetro da clotóide entre duas curvas circulares de raio $R_1$ e $R_2$ ( $R_2 < R_1$ ). ....	15
Fig.7- Visibilidade nas entradas na estrada principal.....	18
Fig.8– Número de vias dos Ramos de Ligação. ....	19
Fig. 9 - Largura de um ramo unidireccional com uma via. ....	20
Fig. 10 - Largura de um ramo unidireccional com duas vias .....	20
Fig. 11 - Largura de um ramo bidireccional com uma via por sentido .....	20
Fig. 12 - Largura de um ramo bidireccional com duas vias por sentido .....	20
Fig. 13 – Esquema de forças a actuar num veículo em movimento rectilíneo e em patamar.....	25
Fig.14 - “Taper” em recta. ....	28
Fig.15 - “Taper” em curva.....	30
Fig.16 – Perfil transversal da estrada principal em alinhamento recto. ....	32
Fig.17 - Perfil transversal da estrada principal no Ponto de osculação alinhamento recto / clotóide... ..	32
Fig.18 - Perfil transversal da estrada principal no ponto de osculação clotóide/curva circular .....	33
Fig.19 -Inclinação relativa dos bordos da faixa de rodagem interior da estrada principal.....	33
Fig.20 - Inclinação relativa dos bordos do extradorso da estrada principal.....	35
Fig. 21 - Cálculo da curvatura no ponto M. ....	37
Fig. 22 – Elementos de uma Concordância vertical.....	42
Fig. 23 - Cálculo do raio mínimo que respeite a distância de visibilidade necessária ( $D > D_v$ ). ....	44
Fig. 24 – Cálculo do raio mínimo de uma concordância côncava ( $D > D_v$ ). ....	46
Fig.25 – Elementos de uma concordância vertical convexa. ....	49
Fig.26-Esquema do tipo de nó em trompette a utilizar. ....	54
Fig.27-Designações dos ramos utilizadas. ....	55
Fig. 28 – “Loop” entre recta e clotóide - Ramo B. ....	59
Fig.29- Curva em “S” e clotóide de saída tangente a um alinhamento recto – Ramo A e Ramo C. ....	61
Fig.30- Curva ovóide e Curva em “S”- Ramo D. ....	62
Fig. 31 – “Encurtamento” do separador. ....	76
Fig. 32-Construção de uma concordância a passar em três pontos. ....	89
Fig. 33- Figura elucidativa para o cálculo da cota mínima a respeitar para o ramo A+B. ....	98



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros geométricos para um nó de ligação. ....	17
Quadro 2 – Distância de visibilidade de decisão na saída da estrada principal. ....	18
Quadro 3 – Distância de visibilidade no caso de intersecção dum ramo de ligação com a estrada principal. ....	19
Quadro 4- Variação máxima da sobrelevação em cada 20,0 metros de extensão segundo a Norma de Nós de Ligação. ....	22
Quadro 5 – Inclinações máximas desejáveis para os ramos de ligação. ....	40
Quadro 6 – Distância de visibilidade de paragem. ....	43
Quadro 7-Pontos a respeitar para o ramo B. ....	92
Quadro 8-Pontos a respeitar para o ramo A. ....	95
Quadro 9-Pontos a respeitar para o ramo A+B. ....	99
Quadro 10-Pontos inicial e final da obra de arte. ....	100
Quadro 11-Pontos a respeitar para a parte inicial do ramo C. ....	104
Quadro 12-Pontos a respeitar para a parte final do ramo C. ....	104
Quadro 13- Pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo D. ....	108
Quadro 14- Pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo D. ....	108
Quadro 15 – Estrada Principal: Elemento 1 – Curva Circular. ....	119
Quadro 16 – Estrada Principal: Elemento 2 – Clotóide. ....	119
Quadro 17 – Estrada Principal: Elemento 3 – Alinhamento recto. ....	119
Quadro 18 – Estrada Principal: Listagem das coordenadas da directriz. ....	120
Quadro 19 – Ramo B: Elemento 1 – Clotóide. ....	121
Quadro 20 – Ramo B: Elemento 2 – Curva Circular. ....	121
Quadro 21 – Ramo B: Listagem das coordenadas da directriz. ....	121
Quadro 22 – Ramo B: Listagem das coordenadas do “taper”. ....	122
Quadro 23 – Ramo A: Elemento 1 – Clotóide. ....	123
Quadro 24 – Ramo A: Elemento 2 – Alinhamento recto. ....	123
Quadro 25 – Ramo A: Elemento 3 – Clotóide. ....	123
Quadro 26 – Ramo A: Elemento 4 – Curva Circular. ....	123
Quadro 27 – Ramo A: Elemento 5 – Clotóide. ....	124
Quadro 28 – Ramo A: Listagem das coordenadas da directriz. ....	124
Quadro 29 – Ramo A: Listagem das coordenadas do “taper”. ....	124
Quadro 30 – Ramo A+B: Elemento 1 – Curva Circular. ....	125
Quadro 31 – Ramo A+B: Elemento 2 – Clotóide. ....	125
Quadro 32 – Ramo A+B: Elemento 3 – Alinhamento recto. ....	125
Quadro 33 – Ramo A+B: Elemento 4 – Clotóide. ....	126
Quadro 34 – Ramo A+B: Elemento 5 – Curva Circular. ....	126
Quadro 35 – Ramo A+B: Elemento 6 – Clotóide. ....	126
Quadro 36 – Ramo A+B: Elemento 7 – Alinhamento recto. ....	126
Quadro 37 – Ramo A+B: Elemento 6 – Clotóide. ....	127
Quadro 38 – Ramo A+B: Elemento 7 – Curva Circular. ....	127
Quadro 39 – Ramo A+B: Elemento 8 – Clotóide. ....	127
Quadro 40 – Ramo A+B: Elemento 9 – Alinhamento recto. ....	127
Quadro 41 – Ramo A+B: Listagem das coordenadas da directriz. ....	128

Quadro 42 – Ramo A+B: Listagem das coordenadas relacionadas com a redução para uma via por sentido. ....	129
Quadro 43 – Ramo C: Elemento 1 – Clotóide. ....	131
Quadro 44 – Ramo C: Elemento 2 – Curva Circular. ....	131
Quadro 45 – Ramo C: Elemento 3 – Clotóide. ....	131
Quadro 46 – Ramo C: Elemento 4 – Alinhamento recto. ....	132
Quadro 47 – Ramo C: Elemento 5 – Clotóide. ....	132
Quadro 48 – Ramo C: Listagem das coordenadas da directriz. ....	132
Quadro 49 – Ramo C: Listagem das coordenadas do “taper”. ....	132
Quadro 50 – Ramo D: Elemento 1 – Clotóide. ....	133
Quadro 51 – Ramo D: Elemento 2 – Curva Circular. ....	133
Quadro 52 – Ramo D: Elemento 3 – Clotóide. ....	133
Quadro 53 – Ramo D: Elemento 4 – Alinhamento recto. ....	134
Quadro 54 – Ramo D: Elemento 5 – Clotóide. ....	134
Quadro 55 – Ramo D: Listagem das coordenadas da directriz. ....	134
Quadro 56 – Ramo D: Listagem das coordenadas do “taper”. ....	134
Quadro 57 – Estrada Principal: Elemento 1 – Concordância Vertical. ....	137
Quadro 58 – Estrada Principal: Elemento 2 – Trainel. ....	137
Quadro 59 – Estrada Principal: Listagem das cotas da rasante. ....	137
Quadro 60 – Estrada Principal: Vértices. ....	138
Quadro 61 – Pontos correspondentes do eixo da estrada principal para a parte inicial do ramo B... 139	
Quadro 62- Pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo B..... 139	
Quadro 63 – Ramo B: Elemento 1 – Trainel. ....	139
Quadro 64 – Ramo B: Elemento 2 – Concordância Vertical. ....	139
Quadro 65 – Ramo B: Elemento 3 – Concordância Vertical. ....	140
Quadro 66 – Ramo B: Elemento 4 – Trainel. ....	140
Quadro 67 – Ramo B: Listagem das cotas da rasante. ....	140
Quadro 68 – Ramo B: Vértices..... 141	
Quadro 69 – Pontos correspondentes do eixo da estrada principal para a parte final do ramo A. .... 143	
Quadro 70- Pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo A. .... 143	
Quadro 71 – Ramo A: Elemento 1 – Trainel. ....	143
Quadro 72 – Ramo A: Elemento 2 – Concordância Vertical. ....	143
Quadro 73 – Ramo A: Elemento 3 – Concordância Vertical. ....	144
Quadro 74 – Ramo A: Elemento 4 – Trainel. ....	144
Quadro 75 – Ramo A: Listagem das cotas da rasante. ....	144
Quadro 76 – Ramo A: Vértices..... 144	
Quadro 77 – Ramo A+B: Elemento 1 – Trainel..... 145	
Quadro 78 – Ramo A+B: Elemento 2 – Concordância Vertical. .... 145	
Quadro 79 – Ramo A+B: Elemento 3 – Trainel..... 145	
Quadro 80 – Ramo A+B: Elemento 4 – Concordância Vertical. .... 145	
Quadro 81 – Ramo A+B: Elemento 5 – Trainel..... 146	
Quadro 82 – Ramo A+B: Elemento 6 – Concordância Vertical. .... 146	
Quadro 83 – Ramo A+B: Elemento 7 – Trainel..... 146	
Quadro 84 – Ramo A+B: Listagem das cotas da rasante..... 147	
Quadro 85 – Ramo A+B: Vértices..... 148	
Quadro 86 – Pontos correspondentes do eixo da estrada principal para a parte inicial do ramo C... 149	

Quadro 87- Pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo C. ....	149
Quadro 88 – Pontos correspondentes do ramo A+B para a parte final do ramo A+B.....	149
Quadro 89- Pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo C. ....	149
Quadro 90 – Ramo C: Elemento 1 – Trainel. ....	149
Quadro 91 – Ramo C: Elemento 2 – Concordância Vertical. ....	150
Quadro 92 – Ramo C: Elemento 3 – Concordância Vertical. ....	150
Quadro 93 – Ramo C: Elemento 4 – Concordância Vertical. ....	150
Quadro 94 – Ramo C: Elemento 5 – Trainel. ....	151
Quadro 95 – Ramo C: Elemento 6 – Concordância Vertical. ....	151
Quadro 96 – Ramo C: Elemento 7 – Trainel. ....	151
Quadro 97 – Ramo C: Elemento 8 – Concordância Vertical. ....	151
Quadro 98 – Ramo C: Elemento 9 – Trainel. ....	152
Quadro 99 – Ramo C: Listagem das cotas da rasante. ....	152
Quadro 100 – Ramo C: Vértices. ....	152
Quadro 101 – Pontos correspondentes do ramo A+B para a parte inicial do ramo D. ....	153
Quadro 102- Pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo D. ....	153
Quadro 103 – Pontos correspondentes da estrada principal para a parte final do ramo D. ....	153
Quadro 104- Pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo D. ....	153
Quadro 105 – Ramo D: Elemento 1 – Trainel. ....	153
Quadro 106 – Ramo D: Elemento 2 – Concordância Vertical. ....	154
Quadro 107 – Ramo D: Elemento 3 – Trainel. ....	154
Quadro 108 – Ramo D: Elemento 4 – Concordância Vertical. ....	154
Quadro 109 – Ramo D: Elemento 5 – Trainel. ....	154
Quadro 110 – Ramo D: Elemento 6 – Concordância Vertical. ....	155
Quadro 111 – Ramo D: Elemento 7 – Trainel. ....	155
Quadro 112 – Ramo D: Elemento 8 – Concordância Vertical. ....	155
Quadro 113 – Ramo D: Elemento 9 – Trainel. ....	155
Quadro 114 – Ramo D: Listagem das cotas da rasante. ....	156
Quadro 115 – Ramo D: Vértices. ....	156





## **ABREVIATURAS**

E.P.- Estradas de Portugal;

C.E. – Caderno de Encargos;

N.N.L. – Norma de Nós de Ligação;

N.I. – Norma de Intersecções;

N.T. – Normas de Traçado;

CEA – Disciplina de Complementos de Estradas e Aeródromos;

V.C.I – Disciplina de Vias de Comunicação I;

V.C.II – Disciplina de Vias de Comunicação II;

J.A.E. – Junta Autónoma de Estradas;

N.E. – Normas Espanholas;

P.I. – Passagem inferior;

P.S. – Passagem superior.



# 1

## INTRODUÇÃO

Entende-se por Geometria do Traçado a parte do Estudo do Traçado para o Projecto de Vias de Comunicação, que analisa as características geométricas constituintes desse traçado, procurando cumprir uma velocidade base para a qual se garanta segurança e comodidade para os condutores. Existem várias condicionantes que influenciam a escolha do traçado: velocidade, as características geotécnicas, a topografia, os condicionamentos urbanísticos, o meio ambiente e os custos. Todos estes factores devem ser analisados de forma a obter-se um traçado que se integre no terreno e que seja económico e seguro.

A escolha de um traçado está estritamente ligada à definição geométrica do traçado em planta (directriz) e do traçado em perfil longitudinal (rasante) do eixo da estrada. Para isso, são utilizados os regulamentos em vigor nos quais são apresentados os critérios de dimensionamento dos parâmetros geométricos. Destacam-se as “Normas de Traçado”, “ Norma de Nós de Ligação” e “Norma de Intersecções”, todas da responsabilidade da ex-JAE.

Fundamentalmente, o trabalho compõe-se de três partes:

- Uma primeira parte, em que se explica sucintamente os elementos necessários para um Projecto de um Nó de Ligação, evidenciando os factores tráfego, segurança e meio ambiente;
- Uma segunda parte na qual se desenvolvem todos os conceitos teóricos para a concepção de um nó de ligação nas especialidades de traçado em planta e em perfil longitudinal. Tendo como base as Normas Portuguesas e o acumular dos conhecimentos académicos adquiridos nas disciplinas de Vias de Comunicação I, Vias de Comunicação II e Complementos de Estradas e Aeródromos, estabelecem-se os critérios mais adequados a serem usados para a definição dos elementos característicos de uma directriz e de uma rasante para um nó de ligação;
- Na terceira e última parte aplicam-se os conceitos desenvolvidos a um nó de ligação em concreto. Pretende-se incluir, além dos elementos constituintes de uma memória descritiva, os fundamentos teóricos que estão na base de um Projecto de Execução para um Nó de Ligação em Trompete.



## 2

# ELEMENTOS NECESSÁRIOS PARA UM PROJECTO DE UM NÓ DE LIGAÇÃO

### 2.1. GENERALIDADES

Entende-se por nó de ligação um conjunto de ramos que permite a ligação entre estradas que se cruzam a níveis diferentes, de modo a eliminar os pontos de conflito. Estes são locais onde as correntes de tráfego sofrem interferência de outras correntes e a melhor forma de eliminá-los é através da construção de um nó de ligação.

Existem vários factores que influenciam a escolha e o local de construção do nó: o volume e composição do tráfego, a velocidade, os condicionamentos urbanísticos e topográficos, a segurança, a rede viária local, o impacte ambiental e o custo.

O estudo de um nó de ligação não deve ser efectuado de uma forma isolada, mas sim analisando todo o lanço da estrada em que se insere. Deverá haver uma certa uniformidade das características operacionais para que os condutores não se deparem com grandes diferenças ao longo do traçado. As saídas durante o percurso percorrido pelos usuários devem ser idênticas e sinalizadas com antecedência, para não criarem dúvidas no momento da decisão. É também fulcral analisar toda a continuidade da trajectória seguida pelo condutor, evitando-se a proximidade entre saídas e entradas, sinalização confusa e trajectórias equívocas. Estas irregularidades aumentam o tempo de reacção dos condutores, levando-os a cometer manobras erradas causadoras de perigo para todos os utentes. Desta forma, a Norma de Nós de Ligação limita o espaçamento mínimo entre nós de ligação (em zona urbana o espaçamento deverá ser de 1 Km enquanto que em zona rural o espaçamento deverá ser de 4 Km).

Este Projecto de Geometria limita-se à zona envolvente do nó de ligação, partindo do pressuposto que o local da sua implantação respeita o espaçamento mínimo entre nós de ligação.

### 2.2. TRÁFEGO

Como em qualquer projecto rodoviário, o tráfego é um condicionamento básico e essencial para a execução de um nó de ligação. Elementos como o tráfego médio diário, os volumes horários de projecto e a composição do tráfego devem ser satisfeitos de acordo com os diferentes movimentos verificados na zona através da construção de um nó. Para um estudo de tráfego completo são normalmente efectuados estudos de origem – destino, definindo-se o tráfego correspondente para cada

ramo de ligação (tráfego médio diário, volume horário de projecto e composição do tráfego) para o respectivo ano-horizonte. Este deverá ser de 20 anos após a abertura prevista ao tráfego.

A influência do estudo do tráfego nas características geométricas do nó não faz parte do âmbito deste projecto, já que foram fornecidos os valores de tráfego médio diário de pesados apenas para efeitos de dimensionamento do pavimento. Por conseguinte, tentou-se assumir valores credíveis para a definição da geometria do nó, tendo em consideração a zona envolvente.

#### **2.2.1. VELOCIDADE**

Para a definição da velocidade dos vários troços de uma estrada é necessário definir primeiro as suas características geométricas. Estas dependem não só do relevo topográfico, mas também da natureza do tráfego e das condições de exploração. Outros factores como a visibilidade, a aderência do pneu/pavimento, o fenómeno de aquaplanagem deverão ser também tomados em conta na definição das características da estrada. Dever-se-á garantir uma certa homogeneidade do traçado, para que as velocidades específicas sejam uniformes e o condutor não varie a velocidade regularmente. Definidas então as características geométricas da estrada, calcula-se a velocidade máxima permitida para as diferentes curvas circulares, considerando a inclinação transversal da estrada e a aderência do pneu/pavimento.

#### **2.2.2. FAIXA DE RODAGEM**

Segundo a Normas de Nós de Ligação, a estrada principal deverá ter na zona do nó no mínimo 2 x 2 vias, mesmo que o perfil transversal - tipo dessa estrada tenha somente duas vias. A Norma de Intersecções refere ainda que, para uma estrada de 2 x 2 vias, a largura da faixa de rodagem deverá ser de 7,0 metros (3,5 m cada via).

### **2.3. SEGURANÇA**

Para garantir segurança num nó de ligação devem-se analisar cuidadosamente as zonas que exigem mais atenção por parte dos condutores dos veículos. De entre os vários locais que exigem uma atenção redobrada, tanto por parte do condutor como por parte do projectista, destacam-se os seguintes: as vias de aceleração e abrandamento, as curvas circulares e de transição, o tipo de pavimento e a protecção lateral. No caso da condução nocturna, a iluminação da zona do nó deverá assegurar condições de segurança semelhantes à condução diurna.

### **2.4. MEIO AMBIENTE**

A construção de um nó tem sempre um impacte ambiental. A forma das estruturas construídas, o número e extensão das vias, os taludes, não podem ser considerados isoladamente, mas sim como parte a integrar numa paisagem, possibilitando um impacte ambiental que não seja negativo, tanto para o condutor como para aqueles que estão no exterior.

# 3

## CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS PARA A CONCEPÇÃO DE UM NÓ DE LIGAÇÃO

### 3.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS EM PLANTA

#### 3.1.1. RAIOS E VELOCIDADE ESPECÍFICA

Os raios das curvas circulares a adoptar em qualquer estrada dependem fundamentalmente dos seguintes factores:

- Relevo topográfico;
- Natureza do tráfego;
- Condições climatéricas;
- Aderência do pneu/pavimento;
- Homogeneidade do traçado;
- Distância de visibilidade.

Definidas as características geométricas calcula-se a velocidade específica (velocidade máxima compatível com as características de cada elemento do traçado, considerado isoladamente) para os diferentes raios das curvas circulares, valor esse que depende da inclinação transversal da estrada ( $S_e$ ), do raio da curva ( $R$ ) e da aderência pneu/pavimento ( $f_t$ ).

A velocidade base ideal de um ramo de ligação deveria corresponder a 85% da velocidade base da estrada principal, [1]. Contudo, este valor é praticamente impossível de atingir devido às condições topográficas e económicas, podendo o valor da velocidade base dos ramos de ligação ir até 50% ou mesmo menos, dependendo do raio considerado, dadas as condições da envolvente.

A Norma de Nós de Ligação não considera prático definir as características geométricas específicas para os ramos de ligação. Todavia, as ligações interiores deverão ter um raio variável entre 35,0 m e 60,0 m, enquanto que as ligações exteriores deverão ter um raio variável entre 180,0 m e 300,0 m.

A velocidade máxima admissível dum veículo ao descrever uma curva circular de raio  $R$  é determinada de forma a que o veículo não derrape para o exterior da curva, como se esquematiza na Fig.1.

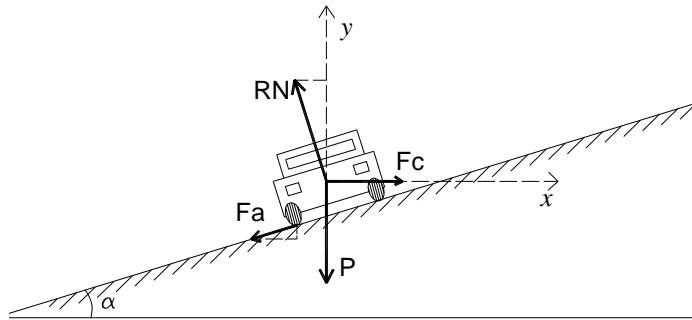


Fig.1– Esquema de forças a actuar num veículo ao descrever uma curva circular de inclinação transversal  $\alpha$ .

P - Peso da viatura;

Fa - Força correspondente à aderência transversal;

Fc – Força centrífuga;

RN – Reacção normal.

A força de aderência transversal é dada pelo produto entre a reacção normal e o coeficiente de aderência transversal:

$$F_a = f_t \cdot R_N \quad (1)$$

Fa [N] - Força correspondente à aderência transversal;

$f_t$  – Coeficiente de aderência transversal.

RN [N] – Reacção normal.

O coeficiente  $f_t$  é um coeficiente de aderência e não de atrito, visto que se parte do princípio que não haverá movimento transversal. Por outras palavras, a aderência poderá definir-se como o atrito a velocidade nula. Caso houvesse movimento relativo entre as duas superfícies em contacto (escorregamento), o coeficiente a utilizar seria o de atrito. Sabe-se, através de ensaios de travagem, que o coeficiente de atrito longitudinal é inferior cerca de 20% ao coeficiente de aderência longitudinal e este, por sua vez, é inferior ao coeficiente de aderência transversal.

A força centrífuga é dada por:

$$F_c = m \cdot a_c = \frac{P}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

Fc [N] – Força centrífuga;

m [Kg] – Massa do veículo;

$a_c$  [ $m/s^2$ ] – Aceleração centrífuga;

P [N] – Peso do veículo;

g [ $m/s^2$ ] – Aceleração da gravidade;

v [m/s] – Velocidade do veículo;

R [m] – Raio da curva circular.



Através do equilíbrio de forças da Fig.1 tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = RN \cdot \sin \alpha + f_t \cdot RN \cdot \cos \alpha = \frac{P}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \\ \sum F_y = RN \cdot \cos \alpha - f_t \cdot RN \cdot \sin \alpha = P \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} RN \cdot (\sin \alpha + f_t \cdot \cos \alpha) = \frac{P}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \\ RN \cdot (\cos \alpha - f_t \cdot \sin \alpha) = P \end{array} \right.$$

Dividindo membro a membro,

$$\frac{\sin \alpha + f_t \cdot \cos \alpha}{(\cos \alpha - f_t \cdot \sin \alpha)} = \frac{v^2}{g \cdot R}$$

Como  $\alpha$  é um valor próximo de zero,  $\cos \alpha \cong 1$  e  $\sin \alpha \cong \tan \alpha = Se$  (sobreelevação); então,

$$\frac{Se + f_t}{(1 - f_t \cdot Se)} = \frac{v^2}{g \cdot R}$$

Substituindo  $g=9,8 \text{ m/s}^2$  e considerando que  $V(\text{m/s}) = V(\text{Km/h})/3,6$

$$v \leq \sqrt{127 \cdot R \cdot \frac{f_t + Se}{1 - f_t \cdot Se}} \quad (3)$$

$V$  [Km/h] – Velocidade específica do veículo;

$R$  [m] – Raio da curva circular;

$F_t$  - Coeficiente de aderência transversal;

$Se$  – Sobreelevação.

A expressão anterior define a velocidade máxima a que o veículo poderá circular numa curva circular de raio  $R$  sem derrapar para o exterior. A Norma de Nós de Ligação não apresenta os valores de  $f_t$  admitidos, mas ao indicar os raios mínimos para cada velocidade base, é possível deduzir os coeficientes de aderência transversal utilizados através da fórmula anterior. Posteriormente, serão apresentados num quadro esses valores.

### 3.1.2. CURVAS CIRCULARES

O raio das curvas circulares deve ser o maior possível, tendo em consideração a respectiva topografia, os condicionamentos urbanísticos e a coordenação com o perfil longitudinal. Quanto maior for o raio melhor é a visibilidade e a percepção do traçado pelos usuários, pelo que os raios mínimos das curvas circulares devem estar relacionados com a extensão dos alinhamentos rectos que as antecedem, de forma a garantir uma homogeneidade do traçado (o raio mínimo deverá ser maior ou igual à extensão do alinhamento recto antecedente em metros), [2]. Porém, esta restrição faz sentido para o pleno traçado, já que no caso de um nó de ligação dificilmente se conseguirá respeitar devido aos pequenos comprimentos dos alinhamentos rectos. Já as curvas circulares devem ter um desenvolvimento tal, que sejam percorridas em mais de dois segundos, [2]. Mais à frente, será apresentado um quadro para as extensões mínimas necessárias para os diferentes raios.

### 3.1.3. CURVAS DE TRANSIÇÃO

As curvas de transição têm as seguintes funções:

- Garantir segurança, ao impedir o aparecimento brusco da força centrífuga através de uma variação gradual de curvatura;
- Assegurar comodidade através de uma variação contínua da aceleração centrífuga entre os alinhamentos rectos e as curvas circulares. As Normas de Traçado definem o limite de  $0,5 \text{ m/s}^3$  para a variação da aceleração centrífuga (San);
- Permitir um disfarce racional da sobreelevação e da sobrelargura da faixa de rodagem;
- Melhorar a comodidade óptica do traçado.

As curvas de transição devem ser clotóides, cuja expressão é a seguinte:

$$A^2 = r.l \quad (4)$$

A [m]- Parâmetro da clotóide;

r [m]- Raio de curvatura num ponto genérico P;

l [m]- Desenvolvimento medido desde a origem até ao mesmo ponto P.

#### 3.1.3.1. Critérios para o dimensionamento de clotóides

Para o dimensionamento das clotóides existem vários critérios que devem ser respeitados para que seja proporcionada uma condução segura e cómoda. Os quatro critérios - [2] - de dimensionamento das clotóides serão explicados de seguida.

a) *Critério de comodidade e segurança*

Dada uma velocidade e um raio da curva circular, a variação da força centrífuga dependerá da extensão da transição. Quanto menor for a extensão, maior será a variação da força centrífuga. O grau de incomodidade (sobreaceleração radial) é traduzido pela seguinte expressão:

$$S_{an} = \frac{v^3}{A^2} \quad (5)$$

$S_{an}$  [m/s<sup>3</sup>] – Sobreaceleração radial (grau de incomodidade);

$V$  [m/s] – Velocidade do veículo;

$A$  [m] – Parâmetro da clotóide.

O veículo ao descrever uma curva circular sobreelevada é submetido a uma aceleração centrífuga não compensada pela sobreelevação ( $j$ ):

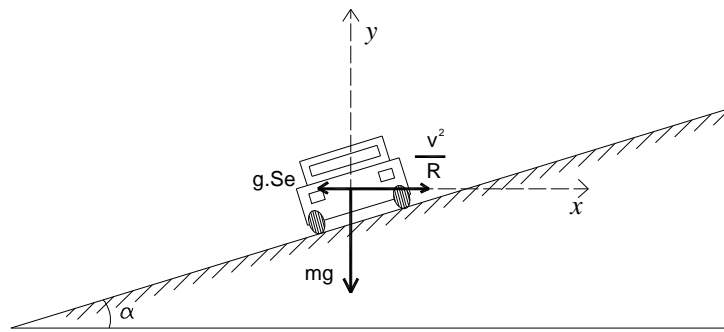


Fig.2– Esquema de forças a actuar num veículo ao descrever uma curva circular de inclinação transversal  $\alpha$ .

Assim:

$$j = \frac{v^2}{R} - g \cdot Se \quad (6)$$

$j$  [m/s<sup>2</sup>] – Aceleração centrífuga não compensada pela sobreelevação;

$V$  [m/s] – Velocidade do veículo;

$R$  [m] – Raio da curva circular;

$g$  [m/s<sup>2</sup>] – Aceleração da gravidade;

$Se$  – Sobreelevação.

O grau de incomodidade ( $S_{an}$ ) poderá ser traduzido pela razão entre a aceleração não compensada pela sobreelevação e o tempo:

$$S_{an} = \frac{j}{t} = \frac{\frac{v^2}{R} - g \cdot Se}{\frac{L}{v}} = \frac{v \cdot \left( \frac{v^2}{R} - g \cdot Se \right)}{L}$$

Substituindo  $L=A^2/r$  e  $V(m/s) = V(Km/h)/3,6$ :

$$A \geq \sqrt{\frac{V \cdot R}{46,656 \cdot San} \cdot \left( \frac{v^2}{R} - 127 \cdot Se \right)} \quad (7)$$

A [m] – Parâmetro da clotóide;

V (Km/h) – Velocidade específica;

R (m) – Raio da curva circular;

San ( $m/s^3$ ) – Sobreaceleração radial;

Se – Sobreelevação.

b) *Critério ligado ao disfarce de sobreelevação*

Seja o seguinte esquema da inclinação relativa dos bordos da faixa de rodagem:

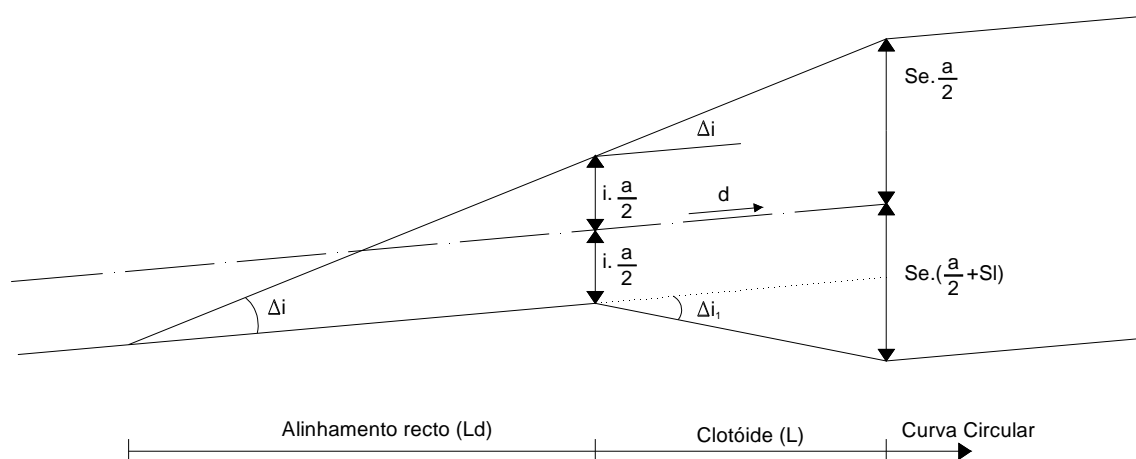


Fig.3- Inclinação relativa dos bordos da faixa de rodagem.

$\Delta i$  [%]– Diferença de inclinação entre o bordo exterior e o eixo;

$\Delta i_1$  [%]– Diferença de inclinação entre o eixo e o bordo interior;

$i$  [%]– Inclinação transversal da estrada;

$a$  [m]– Largura da faixa de rodagem;

$d$  [%]– Inclinação do eixo em perfil longitudinal;

$SI$  [m]– Sobrelargura no início da curva circular.

Note-se que, quando a sobrelargura é igual a zero, o  $\Delta i = \Delta i_1$ . Através da Fig.3 e, desprezando i.a, para alcançar a expressão das Normas de Traçado, conclui-se que:

$$\Delta i = \frac{a \cdot Se}{2 \cdot L} \quad (8)$$

$\Delta i$  [%]– Diferença de inclinação entre o bordo exterior e o eixo;

a [m]– Largura da faixa de rodagem;

Se [%]– Sobreelevação;

L [m] – Extensão da clotóide.

As Normas de Traçado fixam valores máximos e mínimo para o  $\Delta i$ . Então, substituindo  $L = A^2/r$  tem-se:

$$\sqrt{\frac{R \cdot a \cdot Se}{2 \cdot \Delta i_{\max}}} \leq A \leq \sqrt{\frac{R \cdot a \cdot Se}{2 \cdot \Delta i_{\min}}} \quad (9)$$

$\Delta i$  [%]– Diferença de inclinação entre o bordo exterior e o eixo;

a [m]– Largura da faixa de rodagem;

Se [%]– Sobreelevação;

R [m] – Raio da curva circular;

A [m] – Parâmetro da clotóide.

Por vezes, este critério pode causar incompatibilidade entre os dois valores, pelo que nesse caso deverá ser sempre escolhido o termo relacionado com o  $\Delta i_{\min}$  por questões de drenagem, [2].

### c) Critério estético

As curvas de transição deverão ter uma extensão mínima para que sejam esteticamente agradáveis. Deste modo, a curva de transição deverá ser percorrida pelo menos em 2 segundos, [2].

$$L \geq 2 \cdot v$$

Substituindo  $L = A^2/r$  e  $V(m/s) = V(Km/h)/3,6$

$$A \geq \sqrt{\frac{R \cdot v}{1,8}} \quad (10)$$

A [m] – Parâmetro da clotóide;

R [m] – Raio da curva circular;

V [Km/h] – Velocidade específica.

d) *Critério de comodidade óptica*

Para se garantir uma boa percepção óptica, as Normas de Traçado limitam inferiormente o ângulo das tangentes ( $\tau$ ) a  $1/18$  radianos. Então:

$$\tau \geq \frac{1}{18} \text{ rad}$$

Sabendo que,

$$\tau = \frac{l}{2 \cdot r} \quad e \quad L = \frac{A^2}{r}$$

Então,

$$A \geq \frac{1}{3} R \quad (11)$$

A [m] – Parâmetro da clotoide;

R [m] – Raio da curva circular.

O parâmetro mais adequado a utilizar é o valor correspondente ao mais elevado dos quatro critérios anteriores. Para curvas de pequeno raio, normalmente, o critério de comodidade é o mais condicionante, para valores normais do raio é o critério ligado ao disfarce de sobrelevação e para os grandes raios é o de comodidade óptica.

Apesar de não ser definido como critério nas Normas do Traçado, a extensão das curvas de transição deverá estar compreendida entre  $1/2$  e  $2/3$  do desenvolvimento total do alinhamento curvo.

$$\frac{1}{2} D \leq 2 \cdot L \leq \frac{2}{3} D \quad (12)$$

D [m] – Desenvolvimento total do alinhamento curvo ( $D=2L+d$ );

L [m] – Extensão da clotoide.

Sendo o desenvolvimento total do alinhamento curvo (D) igual a  $2L + d$ , em que d é o desenvolvimento da curva circular, tem-se:

$$\frac{1}{2} (2 \cdot L + d) \leq 2 \cdot L \leq \frac{2}{3} (2 \cdot L + d)$$

Ou

$$\frac{d}{2} \leq L \leq d$$

Como  $d = (\Omega - 2\tau).R$ , onde  $\Omega$  é o ângulo de desvio dos alinhamentos rectos e  $\tau$  é o ângulo entre a tangente e o alinhamento recto, e  $\tau = L/(2.R)$ , então,

$$\frac{1}{2}(\Omega - 2\tau).R \leq 2.\tau.R \leq (\Omega - 2\tau).R$$

Ou

$$\frac{\Omega}{6} \leq \tau \leq \frac{\Omega}{4}$$

Visto que  $\tau = L/(2.R)$  e  $L=A^2/r$ , tem-se finalmente:

$$R.\sqrt{\frac{\Omega}{3}} \leq A \leq R.\sqrt{\frac{\Omega}{2}} \quad (13)$$

$\Omega$  [rad] – Ângulo de desvio dos alinhamentos rectos;

$R$  [m] – Raio da curva circular;

$A$  [m] – Parâmetro da clotóide.

O valor do parâmetro  $A$ , dado pela expressão anterior, deverá ser cumprido desde que o intervalo fixado tenha valores que respeitem os 4 critérios de dimensionamento e a condição de implantação.

De preferência, os parâmetros dos arcos de transição que concordam os alinhamentos rectos com a parte circular central devem ser iguais. Quando as curvas circulares tiverem um raio suficientemente elevado de modo a não necessitarem de sobrelevação, as curvas de transição podem ser dispensadas (repare-se que um dos objectivos principais da utilização das curvas de transição era o de serem o local ideal para o disfarce de sobrelevação).

Quando não é possível assegurar o desenvolvimento mínimo das curvas circulares (devem ser percorridas pelo menos em 2 segundos), é conveniente adoptar um parâmetro de clotóide reduzido ( $A=R/3$ ), que alerte os condutores do ponto de vista óptico.

### 3.1.3.2. Condicionantes para a aplicação das curvas de transição

Após a definição dos parâmetros das clotóides, as curvas de transição deverão ainda respeitar as seguintes relações, [2]:

#### a) *Dois alinhamentos rectos e uma curva circular*

A relação entre os parâmetros das clotóides entre dois alinhamentos rectos e uma curva circular deverá ser:

$$\frac{2}{3} \leq \frac{A_1}{A_2} \leq \frac{3}{2} \quad (14)$$

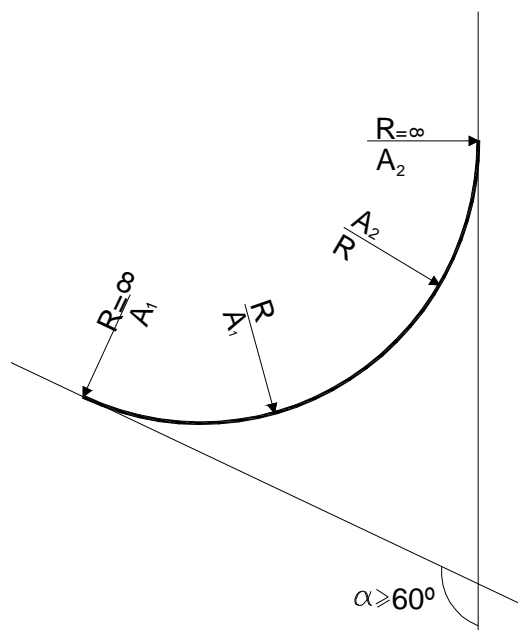


Fig.4- Relação entre os parâmetros das clotóides entre dois alinhamentos rectos e uma curva circular.

Sempre que as condições topográficas e urbanísticas o permitam, os parâmetros das clotóides devem ser iguais.

b) *Duas curvas circulares de sentido contrário*

A relação entre os parâmetros das clotóides deverá respeitar a seguinte relação:

$$\frac{2}{3} \leq \frac{A_1}{A_2} \leq \frac{3}{2} \quad (15)$$

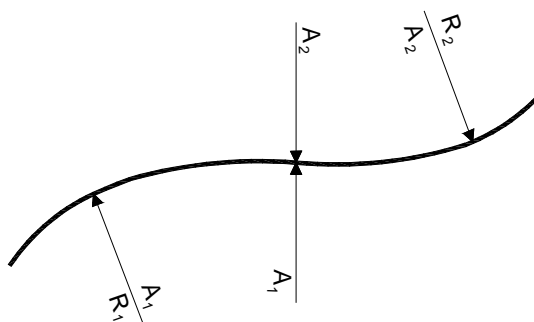


Fig.5- Relação entre os parâmetros das clotóides entre duas curvas circulares de sentido contrário.

Também neste caso, sempre que possível, os parâmetros deverão ser iguais.



c) *Duas curvas do mesmo sentido*

Sendo duas curvas circulares de raio  $R_1$  e  $R_2$  ( $R_2 < R_1$ ), o parâmetro da clotóide compreendida entre as duas curvas deverá ser:

$$\frac{R_1}{3} \leq A \leq R_2 \quad (16)$$

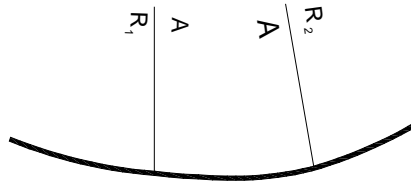


Fig.6- Parâmetro da clotóide entre duas curvas circulares de raio  $R_1$  e  $R_2$  ( $R_2 < R_1$ ).

Além das anteriores relações, devem evitar-se ainda os seguintes casos, [2]:

- *Clotóide em vértice;*

Os parâmetros das clotóides devem ser idênticos e o  $R_o$  da curva osculadora deve ser pelo menos igual a 1,4 vezes o  $R_N$  e maior que 500 m.

$$A_1 \cong A_2$$

$$R_o \geq 1,4R_N$$

- *Duas curvas de transição do mesmo sentido;*
- *Duas curvas de transição consecutivas.*

Existem também alguns casos particulares, mas para o caso de um nó de ligação dificilmente se respeitarão todas as condições impostas para o pleno traçado. Sendo assim, existem algumas particularidades a ter em conta no caso dos ramos de ligação de um nó de ligação que, no subcapítulo seguinte, serão explicadas.

### 3.1.4. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS RAMOS DE LIGAÇÃO

#### 3.1.4.1. Parâmetros geométricos

As curvas de transição a adoptar para um nó de ligação devem ser baseadas nas mesmas condições das exigidas para o pleno traçado. Para raios inferiores a 120 metros, os condutores aceitam valores superiores para a variação da aceleração centrífuga e sobrelevação, já que os ramos de uma maneira geral têm só uma via e são de sentido único. A Norma de Nós de Ligação não apresenta os valores de

$f_t$  admitidos, mas ao fixar os raios mínimos para cada velocidade base é possível deduzir os valores para os coeficientes de aderência transversal utilizados. Já ao fixar também o parâmetro A da clotóide, é possível calcular a sobreaceleração radial ( $S_{an}$ ) para uma sobrelevação de 0%. Note-se que a sobrelevação utilizada pela Norma de Nós de Ligação para determinar o valor mínimo do parâmetro A é de 0%. Este valor facilmente é verificado se se aplicar o critério de comodidade e segurança, pois para um nó de ligação os raios utilizados são relativamente pequenos. Sendo assim, seja tomado como exemplo o caso do raio igual a 45 metros:

$$R=45 \text{ m; Velocidade} = 40 \text{ Km/h; A}=36,0\text{m}$$

Sabendo pela geometria infinitesimal que:

$$S_{an} = \frac{v^3}{46,656 \cdot A^2}, \text{ com } V \text{ em Km/h}$$

Então,

$$S_{an} = \frac{40^3}{46,656 \cdot 36^2} = 1,058 \text{ m/s}^3$$

Substituindo na fórmula do critério de comodidade e segurança:

$$\begin{aligned} A &\geq \sqrt{\frac{V \cdot R}{46,656 \cdot S_{an}} \cdot \left( \frac{v^2}{R} - 127 \cdot Se \right)} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow 36 &\geq \sqrt{\frac{40 \cdot 45}{46,656 \cdot (1,058)} \cdot \left( \frac{40^2}{45} - 127 \cdot Se \right)} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow Se = 0\% , \text{ c.q.d} \end{aligned}$$

Para o cálculo do coeficiente de aderência transversal aplica-se a fórmula (3) da velocidade específica em função do raio:

$$v \leq \sqrt{127 \cdot R \cdot \frac{f_t + Se}{1 - f_t Se}}$$

Considerando então  $Se=0\%$ ,

$$\frac{v^2}{127 \cdot R} = f_t \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow f_t = \frac{40^2}{127.45} = 0,280$$

Procedendo do mesmo modo para os valores definidos pela Norma de Nós de Ligação, chega-se ao seguinte quadro:

Quadro 1 – Parâmetros geométricos para um nó de ligação.

Raio mínimo (Se=0%)	Velocidade específica (Km/h)	Parâmetro da clotóide A (m)	Extensão mínima da curva circular (m)	$\frac{v^2}{3,6^2 R}$ (m/s <sup>2</sup> )	$f_t = \frac{v^2}{3,6^2 R \times g}$	$S_{an} = \frac{v^3}{46,656 \times A^2}$ (m/s <sup>3</sup> )
<b>15</b>	<b>25</b>	<b>15,0</b>	14	3,22	0,328	1,488
<b>25</b>	<b>30</b>	<b>22,5</b>	17	2,78	0,283	1,143
<b>35</b>	<b>35</b>	<b>28,0</b>	20	2,70	0,276	1,172
<b>45</b>	<b>40</b>	<b>36,0</b>	23	2,74	0,280	1,058
<b>60</b>	<b>45</b>	<b>45,0</b>	25	2,60	0,266	0,965
<b>75</b>	<b>50</b>	<b>52,0</b>	28	2,57	0,263	0,991
<b>90</b>	<b>55</b>	<b>60,0</b>	31	2,59	0,265	0,991
<b>120</b>	<b>60</b>	<b>75,0</b>	34	2,31	0,236	0,823

O quadro anterior permite verificar que o valor máximo admissível para a aceleração centrífuga, no caso dos nós de ligação, é de 0,33. g, consideravelmente superior aos 0,22. g do pleno traçado. Quanto à sobreaceleração radial (grau de incomodidade) deverá ser inferior a 1,5 m/s<sup>3</sup>, também bastante superior aos 0,5 m/s<sup>3</sup> considerados para o pleno traçado.

#### 3.1.4.2. Distância de visibilidade

Ao definirem-se os raios dos ramos de ligação, deve-se ter em consideração a distância de visibilidade mínima necessária, quer na entrada e saída da estrada principal, quer na intersecção do ramo com a estrada secundária. Para melhor se perceberem os conceitos posteriormente utilizados, definem-se, desde já, os diferentes tipos de distância de visibilidade:

- *Distância de visibilidade de paragem* – mínima distância de visibilidade de que necessita o condutor de um veículo, que se move a uma dada velocidade, para fazê-lo parar antes de atingir um obstáculo visto na faixa de rodagem;
- *Distância de visibilidade de decisão* – mínima distância de visibilidade de que necessita o condutor de um veículo para tomar decisões atempadas;

##### a) Saída da estrada principal

Para se evitarem as manobras bruscas, os condutores deverão tomar decisões atempadas, pelo que, segundo as definições atrás referidas, a distância de visibilidade de decisão deverá ser sempre maior que a distância de visibilidade de paragem. A distância de visibilidade de decisão, representada no Quadro 2, deve ser garantida nas saídas da estrada principal para que os condutores se apercebam do ramo de ligação antecipadamente. As saídas da estrada principal deverão ser colocadas antes da obra de arte para não induzirem os condutores em erro. Quando não é possível, opta-se pela construção de vias colectoras – distribuidoras ou pelo aumento da extensão da via de abrandamento, a fim de

respeitar a distância de visibilidade necessária. Nas saídas secundárias das vias colectoras - distribuidoras, deve ser assegurada a distância mínima de visibilidade de paragem de 180 metros, [1].

Quadro 2 – Distância de visibilidade de decisão na saída da estrada principal.

Velocidade Base (Km/h)	Distância de visibilidade de decisão (m)
100	330
110	370
120	400

*b) Entrada na estrada principal*

No caso de entrada na estrada principal, o condutor deverá ser prevenido através da distância de visibilidade mínima, de modo a permitir o reconhecimento atempado da faixa de rodagem principal. Através da sinalização, dever-se-á esclarecer o condutor sobre os limites de velocidade da estrada principal e da perda de prioridade, de modo a que a aceleração para se integrar na faixa de rodagem seja a mais adequada, [1].

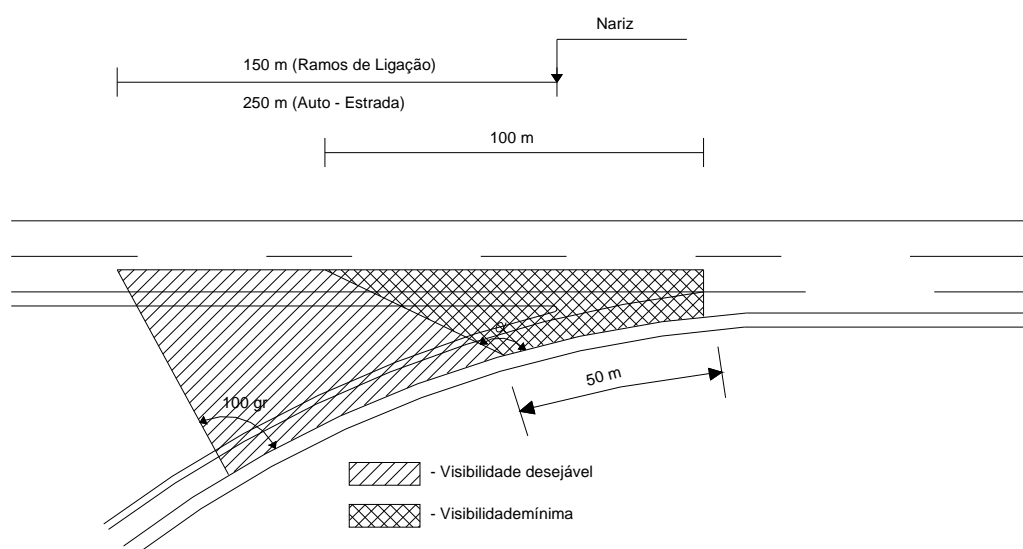


Fig.7- Visibilidade nas entradas na estrada principal.

*c) Intersecção com a estrada secundária*

No caso de um ramo de ligação de saída que intersecta a estrada secundária, a distância de visibilidade mínima é fixada consoante a velocidade base da estrada secundária (ver Quadro 3). Nesta distância não deverá haver restrições à visibilidade horizontal, causadas pelas guardas de segurança, pilares ou

pela própria estrutura. Caso não seja possível respeitar a distância de visibilidade mínima deverá recorrer-se a sinalização luminosa, [1].

Quadro 3 – Distância de visibilidade no caso de intersecção dum ramo de ligação com a estrada principal.

Velocidade Base (Km/h)	Distância de Visibilidade (m)
50	100
60	130
80	165
100	200

### 3.1.4.3. Largura e número de vias dos ramos de ligação

Os ramos de ligação devem ter no mínimo 4,0 metros de faixa de rodagem. As bermas deverão ser pavimentadas, tendo uma largura de 2,5 metros do lado direito e 1,0 metros do lado esquerdo. Geralmente os ramos de ligação dos nós têm apenas uma via por sentido. No entanto, para volumes de tráfego elevados e para ramos de ligação de grande extensão (questão ligada à ultrapassagem) os ramos poderão ter 2 vias por sentido. Para isso, poder-se-á utilizar o seguinte ábaco, dado pela Norma de Nós de Ligação:

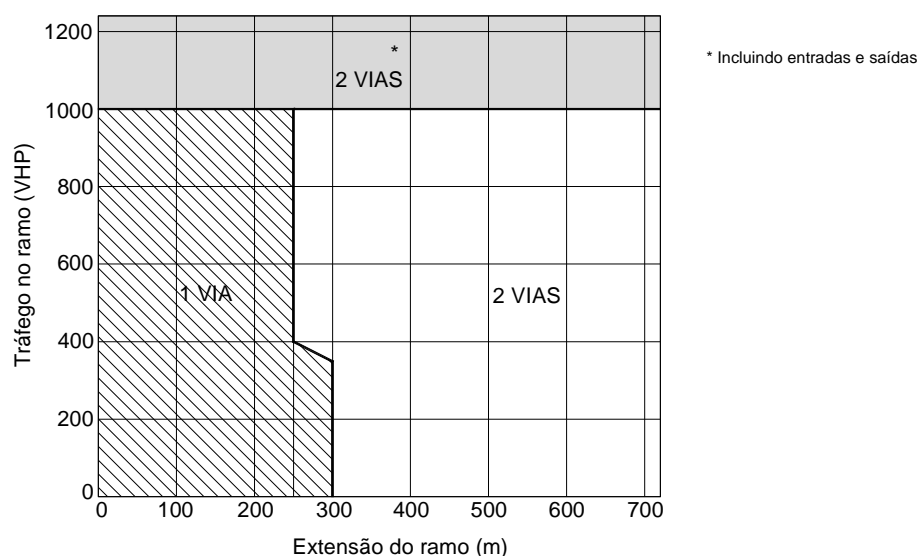


Fig.8– Número de vias dos Ramos de Ligação.

De seguida, apresentam-se, em esquema, as larguras dos ramos a adoptar para as várias possibilidades.

### Ramos “Unidireccionais”

*Uma Via*

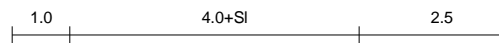


Fig. 9 - Largura de um ramo unidireccional com uma via.

*Duas Vias*



Fig. 10 - Largura de um ramo unidireccional com duas vias

### Ramos “Bidireccionais”

*Uma via por sentido*

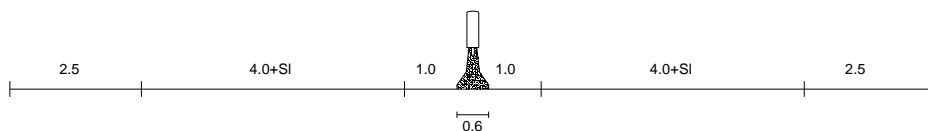


Fig. 11 - Largura de um ramo bidireccional com uma via por sentido

*Duas vias por sentido*

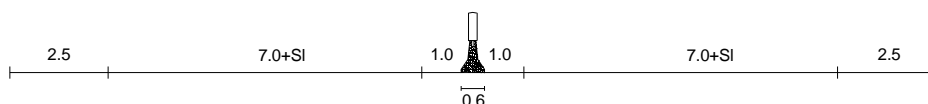


Fig. 12 - Largura de um ramo bidireccional com duas vias por sentido

A passagem de uma para duas vias poderá ser feita com uma curva e contracurva (“taper”). O mesmo acontece para o caso inverso. Para o alargamento do separador deverá ser seguida a Norma de Intersecções.

#### 3.1.4.4. Sobrelevação dos ramos de ligação

De uma maneira geral, as regras para a sobrelevação dos ramos de ligação não são tão rigorosas como para as curvas de uma estrada em plena via. Dever-se-ão adoptar sobrelevações relativamente baixas para que seja possível conjugar o maior número de pontos a respeitar. De qualquer maneira, a sobrelevação nunca deverá ser menor que 2,5%, por questões de drenagem. Para os ramos dos nós a variação máxima da sobrelevação é maior que na estrada comum, chegando a atingir 5,3% por cada 20 m, se a velocidade do ramo for menor que 30 Km/h, [1]. Porém, devido a questões de drenagem, a variação da sobrelevação deverá ser limitada também inferiormente. Através do esquema da inclinação relativa dos bordos da faixa de rodagem (Fig.3), tem-se:

$$L_d = \frac{i \cdot a}{\Delta i} \quad (17)$$

$L_d$  [m] – Extensão do alinhamento recto;

$\Delta i$  [%] – Diferença de inclinação entre o bordo exterior e o eixo;

$i$  [%] – Inclinação transversal da estrada;

$a$  [m] – Largura da faixa de rodagem.

Para que se assegure uma boa drenagem lateral, uma variação cómoda da aceleração transversal não compensada pela sobrelevação e um traçado óptico agradável é importante limitar a inclinação longitudinal do bordo exterior da faixa de rodagem. O seu valor mínimo\* deverá ser dado por:

$$\Delta i_{\min}(\%) = 0,1 \cdot \left( \frac{a}{2} + b \right) \quad (18)$$

$\Delta i_{\min}$  [%] – Diferença de inclinação mínima entre o bordo exterior e o eixo;

$a$  [m] – Largura da faixa de rodagem;

$b$  [m] – Largura da berma.

---

\* As Normas de Traçado consideram  $\Delta i_{\min} = 0,1 \cdot a$ , em que  $a$  é a distância do eixo de rotação ao bordo da faixa de rodagem. Porém, não especificam se o valor 0,1 já entra ou não com o efeito das bermas. Assim, pelo lado da segurança, achou-se mais adequado considerar o efeito das bermas para a equação geral do  $\Delta i_{\min}$ .

Com o intuito de deduzir uma expressão simplificada para o cálculo de  $L_d$ , desprezou-se o efeito das bermas da equação (18) e substituiu-se o  $\Delta i_{\min}$  na equação (17):

$$L_d = \frac{i \cdot a}{0,1 \cdot \frac{a}{2}} = 10 \cdot 2i \quad (19)$$

Então, a variação mínima da sobrelevação em cada 20 m é igual a:

$$\Delta Se(\%) = 20 \cdot \frac{2i}{L_d} = 20 \cdot \frac{2i}{10 \cdot 2i} = 2\%/20m \quad (20)$$

Apesar da variação máxima da sobrelevação já estar fixada, poder-se-á fazer uma dedução semelhante ao fixar um valor máximo para o  $\Delta i$ . Considerando que a velocidade base nos ramos varia entre 40 e 80 Km/h o  $\Delta i_{\max} = 1\%$ , [2]. Assim, substituindo na equação (17), tem-se:

$$L_d = \frac{i \cdot a}{1\%} = i \cdot a$$

A variação máxima da sobrelevação em cada 20 m é igual a:

$$\Delta Se(\%) = 20 \cdot \frac{2i}{L_d} = 20 \cdot \frac{2i}{i \cdot a} = \frac{40}{a} \%/20m \quad (21)$$

Neste caso, a variação máxima da sobrelevação já depende da largura da plataforma. E como seria de esperar, quanto maior é a largura da plataforma menor deverá ser a variação máxima da sobrelevação. Este valor máximo é fixado por razões ópticas e dinâmicas, mas para o caso dos ramos de ligação é praticamente irrelevante devido à sua pequena largura. Sendo assim, a Norma de Nós de Ligação fixa valores máximos para a variação da sobrelevação um pouco inferiores aos dados pela fórmula anterior:

Quadro 4- Variação máxima da sobrelevação em cada 20,0 metros de extensão segundo a Norma de Nós de Ligação.

Velocidade no ramo (Km/h)	Variação máxima da sobrelevação (%) em cada 20,0 metros de extensão
25 a 30	5,3
40	4,7
50	4
>60	3,3



Na zona de confluência dos ramos de ligação com a estrada principal deve-se respeitar sempre o perfil transversal da estrada principal. No projecto em estudo, procurou-se garantir uma continuidade da sobrelevação da estrada principal para os ramos, de forma a não haver qualquer quebra, o que garante a segurança em caso de passagem nessa zona.

#### 3.1.4.5. Sobrelargura dos ramos de ligação

Para raios superiores a 90 m não é necessária sobrelargura, [1]. Quando o raio da curva for inferior a 90 m e o ângulo dos alinhamentos inferior a 130 graus adoptam-se as sobrelarguras recomendadas pela Norma de Nós de Ligação.

As bermas dos ramos de ligação deverão ter uma constituição igual à da faixa de rodagem, para que os veículos pesados as possam utilizar ao descreverem as curvas. Para a berma direita, o valor a escolher deverá ser de 2,5 m e para a berma esquerda de 1,0 m. Os lancis, se houver, deverão ser colocados exteriormente às bermas e serem do tipo galgável, não esquecendo que a sua utilização só pode ser justificada por situações de drenagem difícil. Em zonas rurais não devem utilizar-se lancis, [1].

### 3.1.5. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA ESTRADA PRINCIPAL

#### 3.1.5.1. Vias de abrandamento e aceleração

As entradas e saídas da estrada principal são efectuadas através das vias de aceleração e abrandamento, respectivamente. Estas vias são construídas com o objectivo de proporcionar uma extensão adequada que permita manobras de variação de velocidade sem interferir com o tráfego da via principal. A sua localização deverá assegurar uma boa distância de visibilidade e óptimas condições, dada a exigência de segurança para a entrada/saída da estrada principal. A Norma de Intersecções refere que as vias de abrandamento deverão ser do tipo diagonal, enquanto que as vias de aceleração do tipo paralelo. Por razões de segurança e comodidade, considera-se mais adequado a adopção do tipo paralelo tanto, para vias de abrandamento como para vias de aceleração. Estas vias auxiliares são paralelas à via principal e deverão ter uma largura de 3,5 m após o bisel. As Normas Portuguesas estabelecem a extensão das vias auxiliares do tipo paralelo em função da velocidade base. Para as vias de abrandamento são aplicados factores de correcção devido à inclinação da rasante. No entanto, a extensão das vias de abrandamento/aceleração do tipo paralelo não depende do raio da curva seguinte/precedente. Por conseguinte, as Normas Espanholas serão mais adequadas para o cálculo da extensão das vias de aceleração e abrandamento.

O traçado da zona imediatamente a seguir à divergência do ramo com a estrada principal (“cunha”) deve ter uma boa visibilidade, para que os condutores não fiquem confusos nem hesitantes no momento de tomarem a decisão. Geralmente, a sua extensão deverá estar compreendida entre 20,0 a 30,0 metros. Já o “nariz”, vértice definido pelos limites das vias, deverá ter uma largura de 6,0 metros para uma velocidade base de 100 Km/h, [1]. Por vezes, nem sempre é possível respeitar todas estas condicionantes, mas dever-se-á ter uma especial atenção no caso das saídas da estrada principal, já que o número de acidentes nestes locais é maior do que nas entradas e em plena via.

##### *a) Vias de abrandamento*

Sempre que possível, a via de abrandamento deverá ser localizada numa zona cuja inclinação favoreça o abrandamento dos veículos. Para a parte inicial da via de abrandamento dever-se-á adoptar uma

curva e contracurva (“taper”) de extensão definida pelas Normas Espanholas. O início da via de abrandamento poderá ter uma largura de 1,0 m, assinalando antecipadamente a sua existência para os condutores. O final da via de abrandamento deverá ser no início da curva circular do ramo (ponto que determina a velocidade de entrada). Caso isto não seja possível, por questões de visibilidade, o fim da via de abrandamento deverá ser quando o comprimento da semi-recta perpendicular à bissectriz do ângulo formado pela divergência do ramo com a estrada principal tiver 1 metro.

Apesar do valor da extensão das vias de abrandamento estar tabelado, deduziu-se a expressão da distância de frenagem para uma confirmação do valor fornecido pelas Normas Espanholas. Assim, pelo teorema das forças vivas sabe-se que a variação da energia cinética deverá igualar o trabalho das forças exteriores aplicadas ao sistema:

$$W_{\vec{F}R} = \Delta E_c \quad (22)$$

$W_{\vec{F}R}$  [J] – Trabalho das forças exteriores aplicadas ao sistema;

$\Delta E_c$  [J] – Variação da energia cinética.

Sabe-se que,

$$W_{\vec{F}R} = \vec{F}R \cdot \vec{d} = \|\vec{F}R\| \cdot \|\vec{d}\| \cdot \cos\alpha \quad (23)$$

$W_{\vec{F}R}$  [J] – Trabalho das forças exteriores aplicadas ao sistema;

$\|\vec{F}R\|$  [N] - Resultante das forças aplicadas ao sistema;

$\|\vec{d}\|$  [m] – Deslocamento do veículo;

$\alpha$  [°] – Ângulo entre os vectores deslocamento ( $\vec{d}$ ) e o vector da resultante das forças aplicadas ao sistema ( $\vec{F}R$ ).

E que a resistência total à tracção ( $\sum R$ ) é dada por:

$$\sum R = P \cdot (w_d \pm 0,01i + 0,11j) + w_A \quad (24)$$

$P$  [N] – Peso do veículo;

$w_d$  [N/N] – Resistência específica ao movimento;

$i$  [%] – Inclinação do trainel;

$j$  [m/s<sup>2</sup>] – Aceleração;

$w_A = 0,049 \mu_f S V^2$  – Resistência do ar;

$\mu_f$  – Coeficiente de forma;

$S$  [m<sup>2</sup>] – Superfície frontal;

$V$  [Km/h] – Velocidade relativa.

Seja o seguinte esquema de forças a actuar num veículo, desprezando a resistência do ar, a resistência específica ao movimento e a inclinação da estrada:

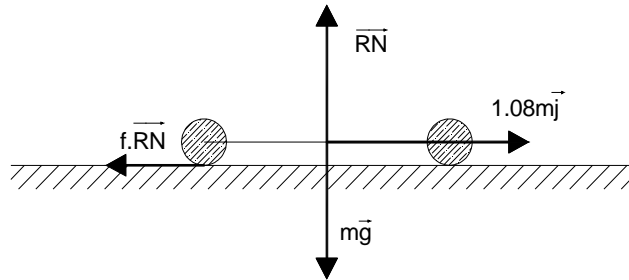


Fig. 13 – Esquema de forças a actuar num veículo em movimento rectilíneo e em patamar.

O valor 1,08 está relacionado com o movimento de rotação das rodas, sendo normalmente de 1,05 para veículos ligeiros e 1,10 para veículos pesados (o valor médio é aproximadamente 1,08). Fazendo o equilíbrio das forças facilmente se verifica que:

$$f = 1,08 \cdot \frac{j}{g} \quad (25)$$

$f$  – Coeficiente de aderência/atrito longitudinal;

$j$  [ $m/s^2$ ] – Aceleração do veículo;

$g$  [ $m/s^2$ ] – Aceleração de gravidade.

Então, desprezando a resistência do ar e considerando  $P \cdot f$  o esforço frenante, tem-se:

$$\sum R = P \cdot (f + w_d \pm 0,01i)$$

Aplicando o teorema das forças vivas:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{P}{g} v_f^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{g} v_i^2 = -P \cdot (f + w_d \pm 0,01i) \cdot d, \quad \cos \alpha = -1 \quad (\alpha = 180^\circ)$$

Substituindo  $g=9,8 \text{ m/s}^2$  e considerando que  $V(m/s) = V(km/h)/3,6$ :

$$d = \frac{v_i^2 - v_f^2}{254 \cdot (f + w_d \pm 0,01i)} \quad (26)$$

$V_i$  [Km/h] – Velocidade inicial;

$V_f$  [Km/h] – Velocidade final;

$f$  – Coeficiente de aderência/atrito longitudinal;

$w_d$  [N/N] – Resistência específica ao movimento;

$i$  [%] – Inclinação da estrada.

Na fórmula anterior,  $f$  poderá ser o coeficiente de aderência ou o coeficiente de atrito, dependendo do tipo de travagem. Se não houver escorregamento, a travagem efectua-se à custa da aderência. Se as rodas forem bloqueadas produz-se o escorregamento e  $f$  passa a ser o coeficiente de atrito, que é inferior ao coeficiente de aderência. Por este motivo, no momento da travagem, não se devem apertar completamente os freios. Deste modo, ao considerar-se o coeficiente de atrito (admitindo escorregamento), está-se pelo lado da segurança, pelo que é o valor geralmente utilizado.

A resistência ao movimento ( $w_d$ ) está essencialmente relacionada com a resistência ao rolamento e com as resistências devidas às irregularidades do pavimento. A sua determinação é feita por via experimental. Dessas experiências conclui-se que, para velocidades moderadas, a resistência específica ao movimento pode ser considerada como constante. Para velocidades elevadas ( $v \geq 14\text{m/s}$ ), a resistência específica ao movimento poderá ser dada pela seguinte expressão empírica, [3]:

$$w_d = w_{d_0} \cdot \left(1 + \frac{v^2}{1500}\right) \quad (27)$$

$W_d$  [N/N] – Resistência específica ao movimento para uma velocidade superior a 14m/s;

$W_{d_0}$  [N/N] – Resistência específica ao movimento a uma velocidade compreendida entre 0 e 14m/s;

$V$  [m/s]– Velocidade do veículo.

Porém, para pavimentos em bom estado, a resistência específica varia entre 0,014 e 0,025 N/N, pelo que o valor médio de 0,02 N/N poderá ser o adoptado para os casos correntes de circulação automóvel, [3].

Considerando uma desaceleração de  $3 \text{ m/s}^2$ , tem-se finalmente:

$$d = \frac{v_i^2 - v_f^2}{254 \cdot (0,35 \pm 0,01i)} \quad (28)$$

$V_i$  [Km/h] – Velocidade inicial;

$V_f$  [Km/h]– Velocidade final;

$i$  [%]– Inclinação da estrada.

#### b) Vias de aceleração

As vias de aceleração devem ser sempre do tipo paralelo com uma largura de 3,5 metros, [4]. Quando possível, devem ser colocadas em declive de modo a facilitar a aceleração dos veículos pesados. A extensão dependerá não só de a curva que as precede, mas também da inclinação do bordo exterior da estrada principal. Mais uma vez as Normas Espanholas serão as mais adequadas para o cálculo da sua extensão. A via de aceleração deverá iniciar-se no final da curva circular precedente, desde que seja respeitada a visibilidade mínima necessária. As Normas Portuguesas referem que a via de aceleração deverá começar quando a distância da semi-recta perpendicular à bissectriz do ângulo formado pela divergência do ramo com a estrada principal tiver 1 metro. Contudo, o veículo poderá começar a acelerar imediatamente a seguir à curva circular, desde que tenha visibilidade. Já o final da via de

aceleração poderá ter 1 metro de largura para que os condutores se apercebam antecipadamente do fim da via auxiliar.

Para a extensão mínima das vias de aceleração poder-se-á também deduzir uma expressão matemática para a sua determinação. Considerando que o veículo está em movimento rectilíneo e uniformemente variado, as equações escalares do movimento são as seguintes:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} j \cdot t^2$$

E,

$$v = \frac{dx}{dt} = v_0 + j \cdot t$$

Eliminando a incógnita  $t$  das equações anteriores chega-se à seguinte fórmula:

$$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot j \cdot \Delta x$$

Logo,

$$\Delta x = \frac{v_f^2 - v_i^2}{25,92 \cdot j}, \quad V_{i,f} \text{ em Km/h}$$

$$\Delta x \geq \frac{v_f^2 - v_i^2}{254 \cdot \frac{j}{g}} \quad (29)$$

$V_f$  [Km/h] – Velocidade final;

$V_i$  [Km/h] – Velocidade inicial;

$j$  [m/s<sup>2</sup>] – Aceleração do veículo;

$g$  [m/s<sup>2</sup>] – Aceleração de gravidade.

Como seria de esperar, a fórmula anterior é muito semelhante àquela que foi deduzida pelo teorema das forças vivas. Ao utilizar as leis de movimento para a translação não se está a considerar, como o nome indica, o efeito de rotação das rodas ( $\alpha=1,08$ ), as irregularidades do pavimento/resistência ao rolamento ( $w_d$ ) e a inclinação da estrada ( $i$ ). Considerando uma aceleração de 1,5 m/s<sup>2</sup> (pelo lado da segurança) tem-se:

$$\Delta x \geq \frac{v_f^2 - v_i^2}{38,88}, \quad V \text{ em Km/h}$$

No fundo, a fórmula deduzida, tanto para as vias de abrandamento como para as vias de aceleração, é exactamente a mesma, diferem apenas na exactidão do valor, já que uma considera mais variáveis. No

projecto em estudo será utilizada a fórmula deduzida pelo teorema das forças vivas, para que o valor seja mais próximo da realidade.

$$d = \frac{v_f^2 - v_i^2}{254 \cdot (0,185 \pm 0,01i)} \quad (30)$$

$V_f$  [Km/h]– Velocidade final;

$V_i$  [Km/h] – Velocidade inicial;

$i$  [%]– Inclinação da estrada.

### 3.1.5.2. Construção do “taper”

Como foi referido, o “taper” é formado por uma curva e contra-curva. Por outras palavras, trata-se de duas curvas circulares de sentido contrário com tangente comum, podendo ser utilizado para o início das vias de abrandamento/aceleração ou para o aumento/redução do número de vias.

#### a) Construção do “taper” em recta

Seja o seguinte esquema de um “taper” em recta:

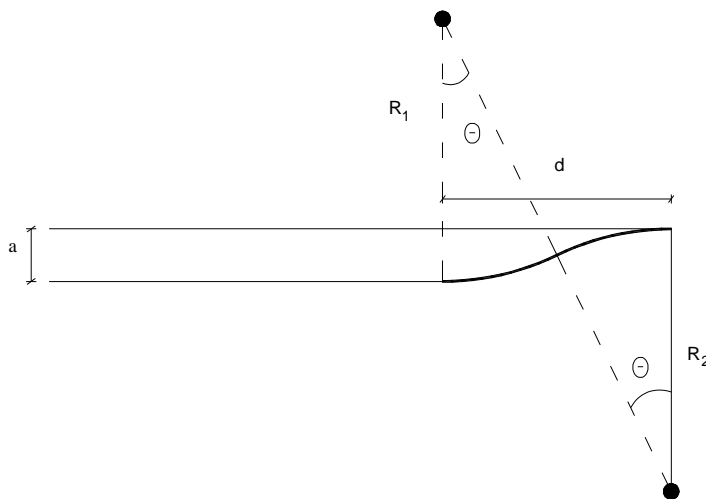


Fig.14 - “Taper” em recta.

$$\begin{cases} (R_1 + R_2) - a = (R_1 + R_2) \cdot \cos\theta \\ d = (R_1 + R_2) \cdot \sin\theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} (R_1 + R_2) \cdot (1 - \cos\theta) = a \\ (R_1 + R_2) \cdot \sin\theta = d \end{cases}$$

Dividindo membro a membro:

$$\frac{1 - \cos\theta}{\sin\theta} = \frac{a}{d}$$

Sabendo que,

$$\cos\theta = \cos\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\theta}{2}\right) = \cos\frac{\theta}{2} \cdot \cos\frac{\theta}{2} - \sin\frac{\theta}{2} \cdot \sin\frac{\theta}{2} = \left(\cos\frac{\theta}{2}\right)^2 - \left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^2$$

$$\cos\theta = \sin\left(\frac{\theta}{2} + \frac{\theta}{2}\right) = \sin\frac{\theta}{2} \cdot \cos\frac{\theta}{2} + \sin\frac{\theta}{2} \cdot \cos\frac{\theta}{2} = 2 \cdot \sin\frac{\theta}{2} \cdot \cos\frac{\theta}{2}$$

Então,

$$\frac{1 - \left(\cos\frac{\theta}{2}\right)^2 + \left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^2}{2 \cdot \sin\frac{\theta}{2} \cdot \cos\frac{\theta}{2}} = \frac{a}{d} \Leftrightarrow \frac{2 \cdot \left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^2}{2 \cdot \sin\frac{\theta}{2} \cdot \cos\frac{\theta}{2}} = \frac{a}{d} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \tan\frac{\theta}{2} = \frac{a}{d}$$

Logo,

$$\theta = 2 \cdot \arctan\left(\frac{a}{d}\right) \quad (31)$$

E

$$R_1 + R_2 = \frac{a}{1 - \cos\theta} \quad (32)$$

Fixando  $R_1$  calcula-se  $R_2$  ou poder-se-á simplesmente estabelecer  $R_1=R_2$ .

b) Construção do “taper” entre duas curvas

Seja a seguinte figura do “taper” em curva:

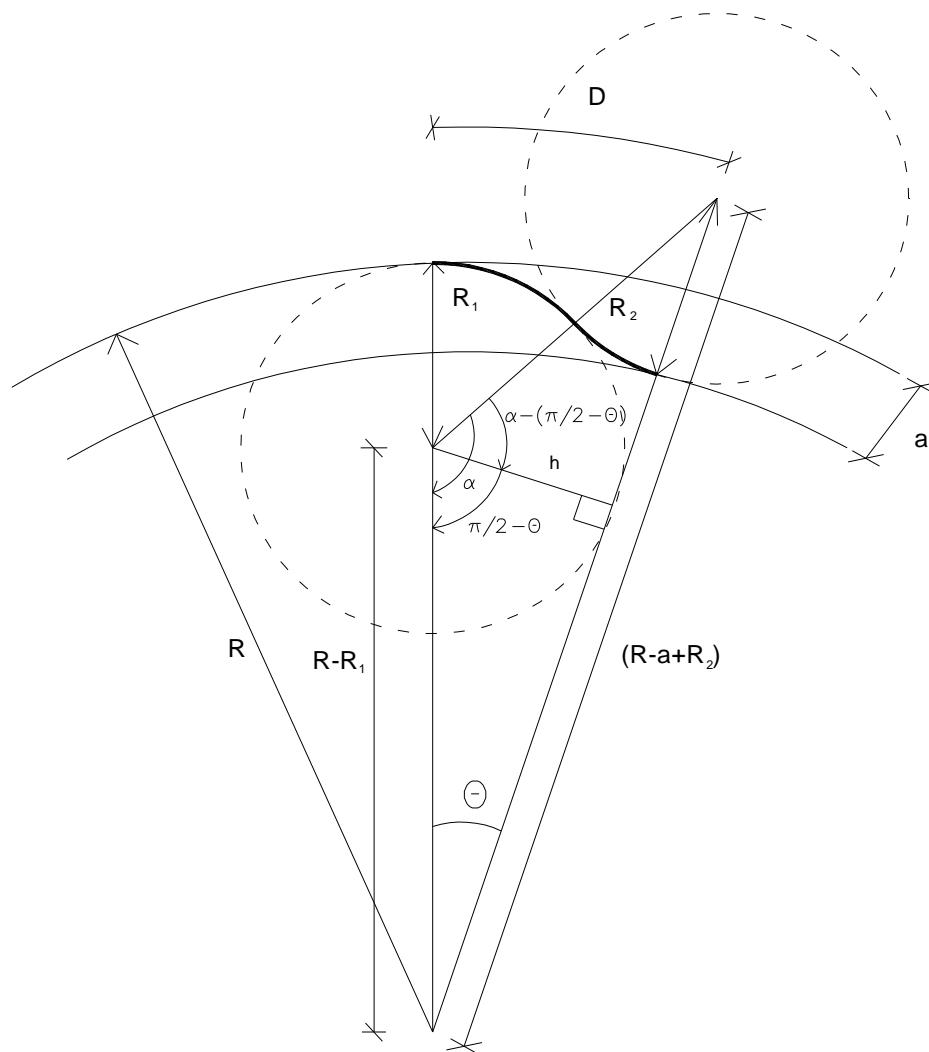


Fig.15 - “Taper” em curva

Pelo Teorema dos co-senos:

$$(R - a + R_2)^2 = (R - R_1)^2 + (R_1 + R_2)^2 - 2 \cdot (R - R_1) \cdot (R_1 + R_2) \cdot \cos \alpha$$



Sendo,

$$h = (R - R_1) \cdot \cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right)$$

E ao mesmo tempo,

$$h = (R_1 + R_2) \cdot \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{2} + \theta \right)$$

Sabendo que,

$$\cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) = \sin (\theta)$$

E,

$$\begin{aligned} \cos \left( (\alpha + \theta) - \left( \frac{\pi}{2} \right) \right) &= \cos(\alpha + \theta) \cos \left( \frac{\pi}{2} \right) + \sin(\alpha + \theta) \sin \left( \frac{\pi}{2} \right) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \cos \left( (\alpha + \theta) - \left( \frac{\pi}{2} \right) \right) &= \sin(\alpha + \theta) \end{aligned}$$

Então,

$$(R_1 + R_2) \sin (\alpha + \theta) = (R - R_1) \sin (\theta)$$

Substituindo na equação anterior  $\theta$  por:

$$\theta = \frac{D}{R}$$

Têm-se as duas equações finais para o cálculo dos raios:

$$\left\{ \begin{array}{l} (R - a + R_2)^2 = (R - R_1)^2 + (R_1 + R_2)^2 - 2 \cdot (R - R_1) \cdot (R_1 + R_2) \cdot \cos \alpha \quad (33) \\ (R_1 + R_2) \sin \left( \alpha + \frac{D}{R} \right) = (R - R_1) \sin \left( \frac{D}{R} \right) \quad (34) \end{array} \right.$$

Arbitrando  $R_1$  calcula-se  $R_2$ . Note-se que, quanto menor for a largura da via ( $a$ ) maior terá de ser o raio a arbitrar.

### 3.1.5.3. Disfarce de sobrelevação

Numa estrada normal, o disfarce da sobrelevação processa-se ao longo da clotóide, mas começando desde logo com um perfil sobreelevado com a inclinação da via de intradorso em alinhamento recto. Para o caso de estradas de faixas separadas, o disfarce da sobrelevação começa ainda em alinhamento recto chegando ao ponto de osculação recta/clotóide com uma inclinação transversal de 0%, aumentando sucessivamente até atingir a sobrelevação pretendida no início da curva circular. Poder-se-á fazer o disfarce da sobrelevação todo na clotóide, mas não é prática corrente em Portugal.

As figuras seguintes ilustram a variação do perfil transversal da faixa de rodagem na zona de disfarce:

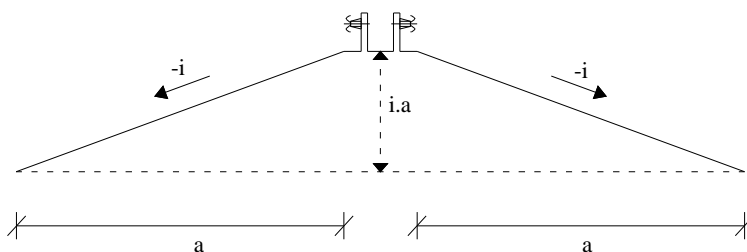


Fig.16 – Perfil transversal da estrada principal em alinhamento recto.

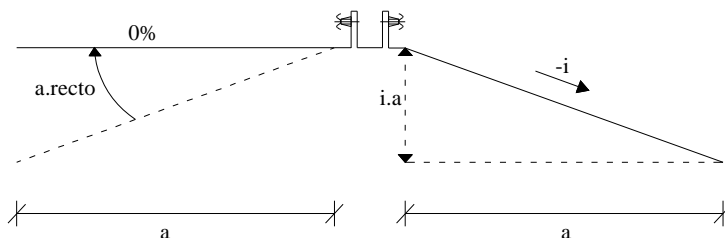


Fig.17 - Perfil transversal da estrada principal no Ponto de osculação alinhamento recto / clotóide.

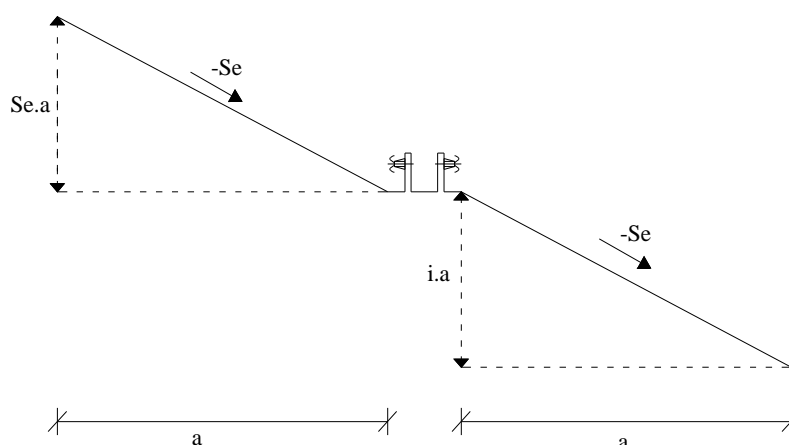


Fig.18 - Perfil transversal da estrada principal no ponto de osculação clotóide/curva circular

a) *Faixa Interior (Intradorso)*

O disfarce em intradorso deve ser linear. Na figura em baixo está esquematizado a inclinação relativa dos bordos da faixa de rodagem interior.

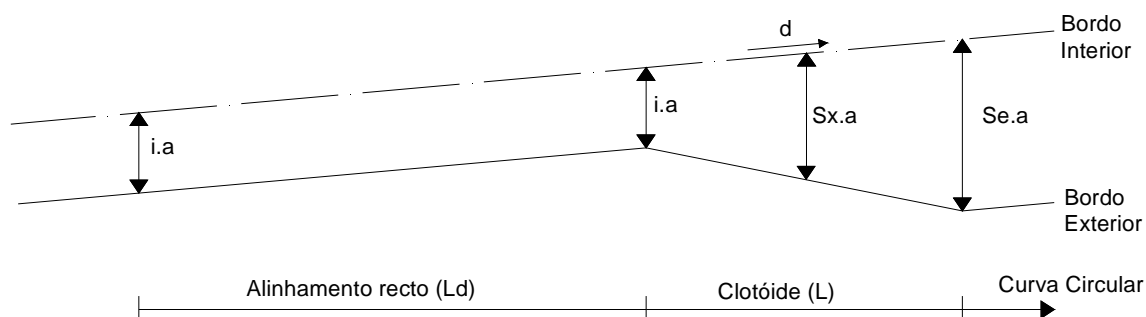


Fig.19 -Inclinação relativa dos bordos da faixa de rodagem interior da estrada principal.

- $i$  [%] – Inclinação transversal da estrada;
- $a$  [m] – Largura da faixa de rodagem;
- $d$  [%]– Inclinação do eixo em perfil longitudinal;
- $S_x$  [%]– Sobrelevação num ponto genérico  $x$  da clotóide;
- $S_e$  [%]– Sobrelevação na curva circular;
- $L_d$  [m] – Extensão do alinhamento recto.
- $L$  [m] – Extensão da clotóide.

Pela Fig.19, conclui-se:

$$S_x \cdot a = \frac{(S_e - i) \cdot a \cdot x}{L} + i \cdot a$$

Ou,

$$S_x = (S_e - i) \cdot \frac{x}{L} + i \quad (35)$$

$S_x$  [%] – Sobrelevação num ponto genérico  $x$  da clotóide;

$S_e$  [%] – Sobrelevação na curva circular;

$i$  [%] – Inclinação transversal da estrada;

$L$  [m] – Extensão da clotóide.

Ao considerar  $i$  como a inclinação transversal mínima que previne a aquaplanagem e como  $S_x$  é sempre maior que  $i$ , esse risco não ocorre.

#### b) Faixa Exterior (Extradorso)

Quando as inclinações longitudinal e/ou transversal da estrada são baixas poderá ocorrer o risco de aquaplanagem nas zonas de inversão da sobrelevação. Em caso de chuva, formam-se linhas de corrente com uma altura de água elevada causadoras do risco de aquaplanagem. Esta situação requer uma especial atenção quando:

- As velocidades de circulação são elevadas;
- As inclinações longitudinais são pequenas;
- As faixas são largas;
- Há grandes extensões dos disfarces das sobrelevações.

Sendo assim, o ponto de inclinação transversal igual a zero (ponto de osculação recta/clotóide) é o ponto crítico para o risco de aquaplanagem. Como não existe inclinação transversal neste ponto, é importante maximizar a inclinação longitudinal para que esse risco não ocorra. Poder-se-ia adoptar um disfarce linear, mas se se adoptar um disfarce parabólico o declive da recta tangente no ponto crítico será maior do que o declive da recta caso se considerasse o disfarce linear.

De seguida, apresenta-se um esquema da inclinação relativa dos bordos da faixa de rodagem, comparando os dois tipos de disfarce.

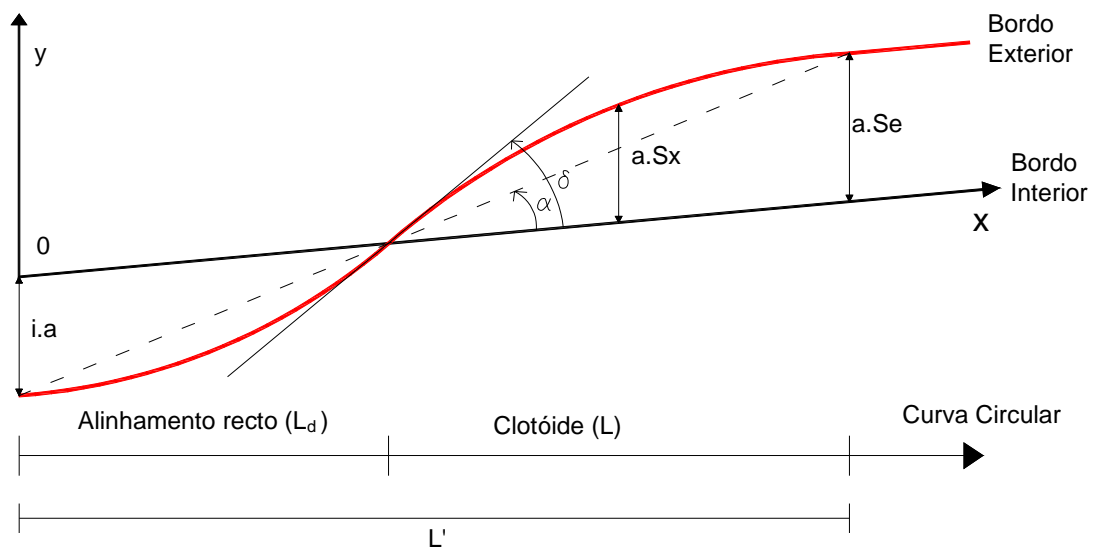


Fig.20 - Inclinação relativa dos bordos do extradorso da estrada principal.

$i$  [%] – Inclinação transversal da estrada;

$a$  [m] – Largura da faixa de rodagem;

$\delta$  – Declive da recta tangente ao ponto de inflexão do disfarce parabólico;

$\alpha$  – Declive da recta considerando o disfarce linear na mesma extensão;

$S_x$  [%] – Sobrelevação num ponto genérico  $x$  da clotóide;

$S_e$  [%] – Sobrelevação na curva circular;

$L_d$  [m] – Extensão do alinhamento recto.

$L$  [m] – Extensão da clotóide.

Segundo as notas da disciplina de Complementos de Estradas e Aeródromos, o disfarce parabólico pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$S_x = \left(3 - \frac{2x}{L'}\right) \cdot \left(\frac{x}{L'}\right)^2 \cdot (S_e + i) - i \quad (36)$$

Verificação:

$X=0$ :  $S_x = -i$  ok!

$X=L'$ :  $S_x = S_e$  ok!

Nota: O ponto de inflexão não tem que ser necessariamente no fim do alinhamento recto!

### ▪ Cálculo de $L_d$

Para o cálculo de  $L_d$  admite-se que a sobrelevação é zero; então:

Para  $x=L_d$  e  $S_x=0$ :

$$0 = \left(3 - \frac{2 \cdot L_d}{L'}\right) \cdot \left(\frac{L_d}{L'}\right)^2 \cdot (Se + i) - i$$

Simplificando a fórmula anterior:

$$L_d^3 - \frac{3}{2} \cdot L' \cdot L_d^2 + \frac{i \cdot L'^3}{2 \cdot (Se + i)} = 0, \text{ com } L' = L_d + L \quad (37)$$

### ▪ Cálculo do declive no ponto crítico

O declive num ponto genérico é dado por:

$$\begin{aligned} \frac{dS_x}{dx} &= (Se + i) \cdot \left[ \frac{d}{dx} \left(3 - \frac{2x}{L'}\right) \left(\frac{x}{L'}\right)^2 + \frac{d}{dx} \left(\left(\frac{x}{L'}\right)^2\right) \left(3 - \frac{2x}{L'}\right) \right] \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \frac{dS_x}{dx} = (Se + i) \cdot \left[ -2 \frac{x^2}{L'^3} + \frac{2x \cdot 3}{L'^2} - \frac{2x \cdot 2x}{L'^2 \cdot L'} \right] \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \frac{dS_x}{dx} = (Se + i) \cdot \left[ \frac{6x}{L'^2} - \frac{6x^2}{L'^3} \right] \end{aligned} \quad (38)$$

Substituindo  $x = L_d$  na fórmula anterior, determina-se a inclinação longitudinal do bordo exterior no ponto crítico (ponto de osculação recta/clotóide).

### ▪ Verificação da visibilidade

A visibilidade mínima necessária é garantida através do cálculo do raio mínimo do disfarce parabólico. Para isso, e como o raio não é constante, calcula-se a curvatura da função  $S_x$ .

Seja a seguinte figura:

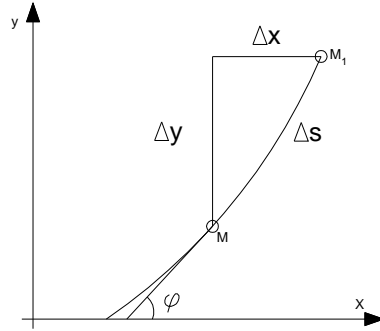


Fig. 21 - Cálculo da curvatura no ponto M.

Pela figura anterior, sabe-se que:

$$\overline{M.M_1}^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$$

Dividindo e multiplicando o primeiro membro por  $(\Delta s)^2$  e de seguida dividindo todos os membros por  $\Delta x$ :

$$\left(\frac{\overline{MM_1}}{\Delta s}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta s}{\Delta x}\right)^2 = 1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2, \quad \text{Como } \lim_{\overline{MM_1} \rightarrow 0} \left(\frac{\overline{MM_1}}{\Delta s}\right) = 1$$

Então,

$$\left(\frac{\Delta s}{\Delta x}\right)^2 = 1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2 \Leftrightarrow \frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

Pela Fig. 21, sabe-se que:

$$\text{tg } \varphi = \frac{dy}{dx} \Leftrightarrow \varphi = \text{arctg } \frac{dy}{dx}$$

Derivando a igualdade anterior em ordem a x, tem-se:

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

Sabendo que a curvatura é dada por  $K = \frac{d\phi}{ds}$ , então:

$$K = \frac{d\phi}{ds} = \frac{\frac{d\phi}{dx}}{\frac{ds}{dx}} = \frac{\frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}$$

Sendo o raio o inverso da curvatura:

$$R = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}{\frac{d^2y}{dx^2}}$$

Além disso, sabe-se que se a segunda derivada de uma função existir num intervalo aberto  $]a, b[$  tem-se:

$$\frac{d^2y}{dx^2} > 0 \text{ , a função tem concavidade voltada para cima (côncava)}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} < 0 \text{ , a função tem concavidade voltada para baixo (convexa)}$$

Porém, a convenção rodoviária de sinais considera o raio das concordâncias côncavas negativo, pelo que se torna necessário multiplicar por -1 a fórmula do raio de curvatura:

$$R = - \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}{\frac{d^2y}{dx^2}} \quad (39)$$



Derivando a fórmula (38):

$$\frac{d^2 S_x}{dx^2} = (S_e + i) \left[ \frac{6}{L'^2} - \frac{12x}{L'^3} \right] \quad (40)$$

Substituindo na fórmula (39), tem-se finalmente a fórmula geral do raio de curvatura:

$$R = - \frac{\left[ 1 + \left( (S_e + i) \left( \frac{6x}{L'^2} - \frac{6x^2}{L'^3} \right) \right)^2 \right]^{3/2}}{(S_e + i) \left( \frac{6}{L'^2} - \frac{12x}{L'^3} \right)} \quad (41)$$

Sendo  $L' = L + L_d$

$L'$  [m] – comprimento da clotóide;

$L_d$  [m] – extensão do alinhamento recto abrangido pelo disfarce da sobrelevação;

$i$  [%] – Inclinação transversal da estrada;

$S_e$  [%] – Sobrelevação na curva circular.

Através da equação (41) conclui-se que o raio da função  $S_x$  começará com um valor mínimo crescendo até ao ponto de inflexão onde atinge o valor máximo ( $\infty$ ). Após este ponto, começará a decrescer até atingir novamente o valor mínimo no início da curva circular.

### 3.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS EM PERFIL LONGITUDINAL

Após o estudo do desenvolvimento do traçado em planta, definem-se as características da rasante com base no perfil longitudinal do terreno que lhe corresponde. A rasante da estrada deve estar o mais próxima do terreno natural, para que os movimentos de terra sejam menores e, consequentemente, o custo de construção seja o mais baixo possível. Além da topografia do terreno, existem outros factores que determinam a escolha da rasante, como a integração no meio ambiente, a drenagem das águas pluviais, as distâncias de visibilidade necessárias e o nível de serviço a garantir.

A rasante é constituída por trainéis e concordâncias verticais, que podem ser circulares ou parabólicas. A utilização das curvas parabólicas traz pequenas vantagens relacionadas com a visibilidade e a comodidade de circulação, já que a força centrífuga terá uma variação gradual ao longo do plano vertical. No entanto, devido aos valores elevados dos raios adoptados e da pequena variação da inclinação entre dois trainéis consecutivos, as curvas circulares são praticamente coincidentes com as curvas parabólicas, pelo que qualquer uma das duas curvas pode ser adoptada.

Em suma, a rasante fica definida através de dois elementos:

- Pelos trainéis, em que a inclinação é constante;
- E pelas concordâncias verticais, em que a inclinação varia linearmente com o percurso (no caso das parábolas do 2º grau).

### 3.2.1. TRAINÉIS

#### 3.2.1.1. Inclinação máxima

A inclinação máxima dos trainéis dos ramos de ligação é essencialmente controlada pela extensão das curvas verticais necessária para obter a distância de visibilidade de paragem imposta pela velocidade base. Além disso, as características do veículo, a aderência longitudinal no contacto pneu/pavimento e o volume de tráfego também interferem no valor da inclinação máxima.

As inclinações máximas desejáveis para os ramos de ligação apresentam-se no seguinte quadro, [1]:

Quadro 5 – Inclinações máximas desejáveis para os ramos de ligação.

Velocidade base (Km/h)	Rampa	Declive
≥70	3% - 5%	7%
55 - 70	4% - 6%	8%
40 - 55	5% - 7%	9%
25 - 40	6% - 8%	10%

Existem ainda certas restrições quando o ramo de ligação atinge a estrada secundária. A escolha da inclinação deve ter em consideração o perfil transversal da estrada secundária e a proximidade de outras intersecções, bem como os seguintes condicionamentos:

- As rampas de saída devem ligar à estrada secundária numa zona em que o trainel desta seja igual ou inferior a 3%, de modo a assegurar o rápido arranque dos veículos pesados;
- No caso da rampa terminar numa concordância convexa da estrada secundária, os últimos 15 metros da rampa devem ter uma inclinação igual ou inferior a 5%;
- As intersecções dos ramos de ligação em declive com a estrada secundária devem localizar-se em zonas em que a inclinação do trainel desta seja igual ou inferior a 4%, de forma a permitir uma concordância mais suave e evitar elevadas inclinações transversais no ramo de ligação.

#### 3.2.1.2. Inclinação mínima

A Norma de Nós de Ligação não refere claramente qual deverá ser o valor mínimo da inclinação longitudinal de um trainel. Ao limitar-se inferiormente a inclinação transversal e a variação da sobrelevação, garante-se, à partida, uma boa drenagem das águas superficiais. Contudo, as Normas de Traçado estabelecem para a inclinação mínima do trainel 0,5%, quando se trata de plena via.

Nas zonas de curva em planta, a Norma especifica que a inclinação do trainel deve ser superior à inclinação secundária induzida pelo disfarce da sobrelevação, em pelo menos 0,5%:

$$i \geq 0,5\% + \Delta i_e \quad (42)$$

$i$  [%] – Inclinação do trainel;

$\Delta i_e$  [%] – Inclinação longitudinal do bordo exterior da faixa de rodagem em relação ao eixo.

O valor mínimo para a diferença de inclinações entre o bordo do extradorso e o eixo, dado pela equação (18), é igual a:

$$\Delta i_{\min}(\%) = 0,1. (a + b)$$

Em que  $a$  é a distância do eixo de rotação ao bordo da faixa de rodagem e  $b$  é a largura da berma. Sabendo que a largura mínima de uma ramo deverá ser 4,0 e que a berma esquerda deverá ter 1,0m, então:

$$\Delta i_{\min} = 0,1. (4,0 + 1,0) = 0,5\%$$

Logo,

$$i \geq 0,5\% + 0,5\% = 1,0\%$$

Ou seja, a inclinação mínima dos trainéis em zonas de curva em planta deverá ser 1,0%. Este valor poderá não ser possível atingir no caso dos ramos de um nó de ligação, tendo em linha de conta as várias condicionantes que este possa ter. Mas, ao limitar-se inferiormente a variação da sobrelevação em 2%/20m (ver capítulo 3.1.4.4), garante-se a drenagem das águas superficiais. Por este motivo, para a inclinação mínima dos trainéis será considerado o valor de 0,5%.

As Normas de Traçado referem ainda a máxima extensão que um trainel pode ter sem provocar uma redução excessiva da velocidade dos veículos pesados, mas como os ramos de um nó de ligação são de pequena extensão, em princípio não haverá problemas nesse sentido. Deve-se, porém, dar uma especial atenção aos ramos de elevada inclinação.

### 3.2.2. CONCORDÂNCIAS VERTICAIS

Por questões de visibilidade e de comodidade, a curvatura deverá estar limitada. Para o caso das concordâncias convexas, a visibilidade é a mais condicionante, enquanto que para as concordâncias côncavas, com boa visibilidade, são muitas vezes definidas pelo limite de comodidade. Como foi atrás referido, as concordâncias verticais do tipo parabólico trazem pequenas vantagens relacionadas com a visibilidade e a comodidade.

As concordâncias verticais devem estar o mais próximo possível do terreno natural, não só para se reduzirem os custos de construção, mas também por questões paisagísticas. Deve também evitar-se

duas concordâncias verticais do mesmo sentido, principalmente as concordâncias côncavas, pois criam efeitos ópticos desagradáveis.

De seguida, será deduzida a relação entre a extensão de uma concordância vertical e o seu raio mínimo.

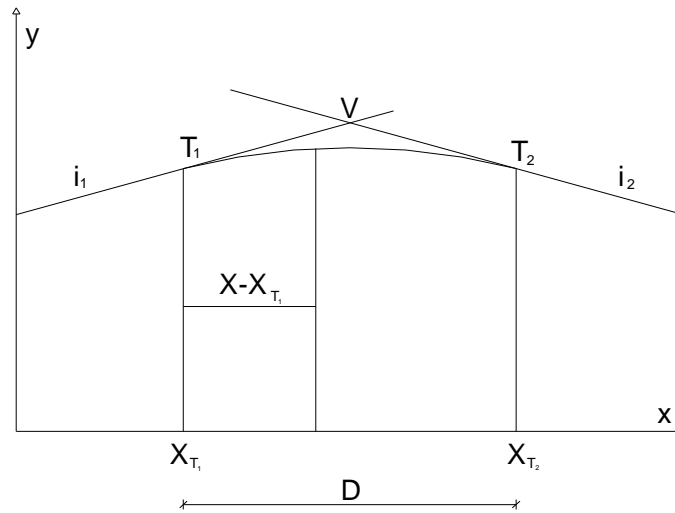


Fig. 22 – Elementos de uma Concordância vertical.

De acordo com a figura anterior, a inclinação num ponto genérico pode ser traduzida pela seguinte expressão linear:

$$i = i_1 + \frac{1}{K_v} \cdot (x - x_{T_1}) \quad (43)$$

Sendo  $D = x_{T_2} - x_{T_1}$ ,

$$i_2 = i_1 + \frac{1}{K_v} \cdot D$$

Então,

$$K_v = \frac{D}{i_2 - i_1} \quad (44)$$

D [m]– Desenvolvimento da concordância vertical medido em projecção ao longo do eixo dos xx;

$i_1$  [m/m] - Inclinação da rasante na tangente de entrada;

$i_2$  [m/m]- Inclinação da rasante na tangente de saída;

$K_v$  – Parâmetro constante.

Sendo linear a variação da inclinação, então a variação de  $y$  em função de  $x$  é de segundo grau, chegando-se a uma parábola em que no seu vértice apresenta o raio mínimo dado pelo parâmetro  $K_v$ . Devido à convenção rodoviária de sinais (ver capítulo 3.1.5.3), deve-se multiplicar por -1 a equação (44) para que um raio positivo fique associado às concordâncias convexas e um raio negativo às concordâncias côncavas.

Então,

$$R = \frac{D}{i_1 - i_2} \quad (45)$$

$R$  [m] – Raio mínimo da concordância vertical (positivo se convexa e negativo se côncava);

$D$  [m] - Desenvolvimento da concordância vertical medido em projecção ao longo do eixo dos  $xx$ ;

$i_1$  [m/m] - Inclinação da rasante na tangente de entrada;

$i_2$  [m/m] - Inclinação da rasante na tangente de saída.

Para se garantir uma boa segurança de circulação e uma adequada distância de visibilidade dever-se-á adoptar um raio elevado. Já a comodidade óptica e a estética estão mais relacionadas com o desenvolvimento das concordâncias verticais.

### 3.2.2.1. Concordâncias convexas

#### a) Raio mínimo

Os raios mínimos das concordâncias convexas devem assegurar a distância de visibilidade mínima, a fim de proporcionar segurança durante a circulação. O critério relacionado com a visibilidade será mais limitativo do que o critério relacionado com a incomodidade, já que considerando como limite de incomodidade uma aceleração vertical de  $0,25 \text{ m/s}^2$ , o raio ficará muito aquém do calculado através da visibilidade. Assim, o raio mínimo deverá garantir a distância de visibilidade necessária ( $D_v$ ) que, para o caso de estradas unidireccionais, é a mínima distância de visibilidade de paragem ( $D_p$ ), representada no Quadro 6 em função da velocidade base, [4].

Quadro 6 – Distância de visibilidade de paragem.

Velocidade Base (Km/h)	Distância Mínima (m)
40	40
50	60
60	80
70	100
80	120
100	180
120	250

No estudo das concordâncias convexas, há duas hipóteses a considerar:

- O desenvolvimento da concordância ( $D$ ) é superior à distância de visibilidade necessária ( $D_v$ );
- O desenvolvimento da concordância ( $D$ ) é inferior à distância de visibilidade necessária ( $D_v$ ).

As Normas de Traçado referem que o caso do desenvolvimento da concordância ( $D$ ) ser inferior à distância de visibilidade necessária ( $D_v$ ) não tem interesse prático. Além disso, sabe-se, por dedução matemática, que o valor do raio mínimo para o caso de  $D < D_v$  é sempre inferior à situação em que  $D > D_v$ , [5]. Então, pelo lado da segurança, considera-se para todos os casos a situação em que o desenvolvimento da concordância ( $D$ ) é superior à distância de visibilidade necessária de segurança ( $D_v$ ), isto é, pressupondo que o veículo e o obstáculo se situam dentro da concordância. De forma a ser mais simples a determinação do raio mínimo, considerar-se-á uma curva circular em vez de parabólica. Como os raios são geralmente elevados, a curva parabólica assemelha-se à curva circular, pelo que será esta a considerada por motivos de facilidade. A figura seguinte esquematiza a situação em estudo:

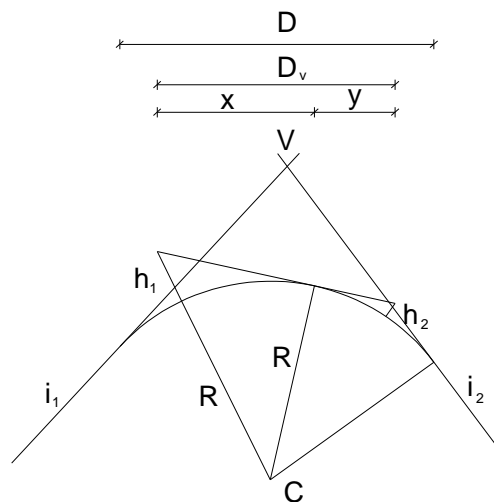


Fig. 23 - Cálculo do raio mínimo que respeite a distância de visibilidade necessária ( $D > D_v$ ).

$i_1$  e  $i_2$  – Inclinação dos trainéis;

$h_1$  – Altura dos olhos do condutor em relação ao plano da estrada;

$h_2$  – Altura do obstáculo em relação ao plano da estrada.

A distância medida a rasar tangencialmente o solo, desde os olhos do condutor até ao obstáculo deve ser no mínimo igual à distância de visibilidade necessária. Então, pela Fig. 23, tem-se:

$$x = \sqrt{(R + h_1)^2 - R^2} = \sqrt{2Rh_1 + h_1^2} \cong \sqrt{2Rh_1}$$

$$y = \sqrt{(R + h_2)^2 - R^2} = \sqrt{2Rh_2 + h_2^2} \cong \sqrt{2Rh_2}$$

Como  $D_v = x + y$ ,

$$D_v = \sqrt{2Rh_1} + \sqrt{2Rh_2} \Leftrightarrow D_v^2 = (\sqrt{2Rh_1} + \sqrt{2Rh_2})^2 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow D_v^2 = 2 \cdot R(h_1 + h_2 + 2\sqrt{h_1 h_2})$$

Então,

$$R \geq \frac{D_v^2}{2(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}$$

As Normas de Traçado fixam os valores de  $h_1$  (altura dos olhos do condutor à plataforma) em 1,05 m e  $h_2$  (altura do obstáculo) em 0,15m. Substituindo na expressão anterior:

$$R \geq \frac{D_v^2}{2(\sqrt{1,05} + \sqrt{0,15})^2}$$

$$R \geq \frac{D_v^2}{4} \quad (46)$$

$R$  [m] – Raio mínimo para as concordâncias convexas;

$D_v$  [m] – Distância de visibilidade necessária que, para o caso de estradas unidireccionais, é a mínima distância de visibilidade de paragem ( $D_p$ ), apresentada no Quadro 6.

#### b) Desenvolvimento Mínimo

Quanto ao desenvolvimento mínimo e, como as faixas de rodagem são unidireccionais, as Normas de Traçado consideram que a concordância deverá ser percorrida pelo menos em 3,6 segundos, a fim de assegurar um conforto óptico para os condutores:

$$D(m) \geq V(Km/h) \quad (47)$$

No caso dos ramos dos nós, será muito difícil respeitar esta restrição, sendo que a principal preocupação será respeitar o raio mínimo, já que é este que garante a segurança na circulação, ao contrário do desenvolvimento mínimo que se relaciona com a estética e a comodidade óptica dos condutores.

### 3.2.2.2. Concordâncias côncavas

O raio e o desenvolvimento das concordâncias côncavas dependem não só da comodidade, mas também da visibilidade nocturna. Para velocidades inferiores a 80 Km/h, a visibilidade estará limitada pela distância iluminada pelos faróis. Já o critério relativo à comodidade é predominante para velocidades elevadas ( $V_B \geq 80 \text{ Km/h}$ ), pelo que a aceleração vertical não deve ultrapassar os  $0,25 \text{ m/s}^2$ , [2]. Note-se que, para velocidades superiores a 80 Km/h a distância de visibilidade de paragem assume valores elevados ( $D_p \geq 120 \text{ m}$ ), não sendo por isso possível a iluminação a distâncias tão elevadas.

Como no caso das concordâncias convexas, haverá também duas hipóteses a estudar para as concordâncias côncavas:

- O desenvolvimento da concordância ( $D$ ) é superior à distância de visibilidade necessária ( $D_v$ );
- O desenvolvimento da concordância ( $D$ ) é inferior à distância de visibilidade necessária ( $D_v$ ).

Tendo em consideração que os raios mínimos dados pela situação em que  $D > D_v$  são sempre superiores aos que resultam da situação em que  $D < D_v$ , considera-se para todos os casos de determinação do raio mínimo das concordâncias côncavas a situação em que  $D > D_v$ , [5].

#### a) Raios Mínimos

Então, supondo que a velocidade é inferior a 80 Km/h e que  $D > D_v$ , seja a seguinte figura:

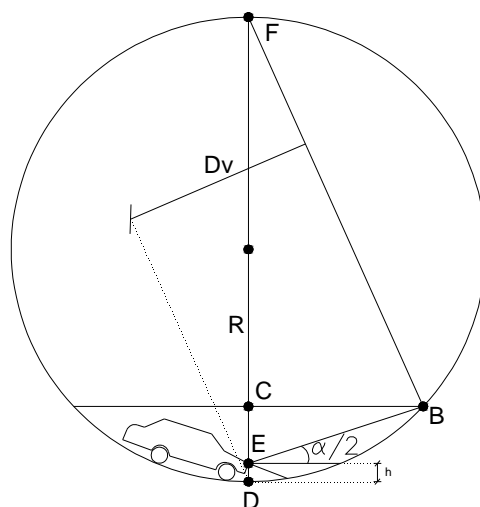


Fig. 24 – Cálculo do raio mínimo de uma concordância côncava ( $D > D_v$ ).



O raio mínimo da concordância será calculado para que a extensão de estrada iluminada pelos faróis seja pelo menos igual à distância de visibilidade  $D_v$ . Considerando que os faróis de um veículo projectam um cone de luz com a abertura de  $\alpha$  graus a uma altura  $h$  acima da plataforma e pela semelhança dos triângulos CDB e DBF:

$$\frac{\overline{DB}}{\overline{DF}} = \frac{\overline{CD}}{\overline{DB}}$$

Sabendo que,  $\overline{DB} = D_v$  e  $\overline{DF} = 2R$ ,

$$R = \frac{D_v^2}{2\overline{CD}}$$

E considerando a altura dos faróis  $h$  igual a  $\overline{ED}$ :

$$\overline{CD} = \overline{CB} \tan \frac{\alpha}{2} + h$$

Dado que o raio será elevado, pode-se fazer a aproximação  $\overline{CB} \cong D_v$ :

$$\overline{CD} = D_v \cdot \tan \frac{\alpha}{2} + h$$

Finalmente, tem-se:

$$R \geq \frac{D_v^2}{2(D_v \cdot \tan \frac{\alpha}{2} + h)}$$

Considerando  $h = 0,60\text{m}$ ,  $\alpha = 2^\circ$  e sendo  $D_v$  igual à distância de visibilidade de paragem correspondente a cada velocidade ( $v \leq 80 \text{ Km/h}$ ):

$$R \geq \frac{D_p^2}{1,2 + 0,035 \cdot D_p} \quad (48)$$

Para o caso de velocidades superiores a 80 Km/h, o critério limitativo é o da comodidade, fixando-se o limite em  $0,25\text{m/s}^2$  para a aceleração vertical, [2]. Então:

$$R \geq \frac{v^2}{0,25}$$

Sabendo que  $V(\text{m/s}) = V(\text{Km/h})/3,6$ :

$$R \geq \frac{v^2}{3,24}, \quad v \text{ em Km/h} \quad (49)$$

Estas restrições são principalmente condicionantes para o pleno traçado, enquanto que para o caso dos ramos dos nós nem sempre é possível respeitar o raio mínimo das concordâncias côncavas, devido ao valor elevado deste. Considerando que nos ramos de ligação a velocidade base pode variar de 40 Km/h a 80 Km/h, o critério condicionante é o da visibilidade nocturna, não havendo problema durante o período diurno. Deste modo, é dada alguma tolerância para o caso das concordâncias côncavas, optando-se, no projecto em estudo, por utilizar o raio mínimo das concordâncias convexas para todas as concordâncias.

#### b) *Desenvolvimentos Mínimos*

O desenvolvimento mínimo para as concordâncias côncavas será baseado no critério de conforto óptico como foi para o caso das concordâncias convexas, sendo os valores de desenvolvimento mínimo normal iguais em ambas as situações.

### 3.2.3. COTAS DO PROJECTO

#### 3.2.3.1. Em trainel

Como em trainel a inclinação é constante, a cota de um ponto genérico é dada pela seguinte equação linear:

$$y = y_a + i \cdot x \quad (50)$$

Y – Cota de um ponto do trainel;

Y<sub>a</sub> – Cota de o ponto conhecido;

i – Inclinação do trainel;

x – Distância ao longo do eixo em planta entre o ponto de cota conhecida e o ponto de cota pretendida.

### 3.2.3.2. Em concordância

A inclinação num ponto genérico da concordância é dada pela equação linear (43):

$$i = i_1 + \frac{1}{K_v} \cdot (x - x_{T1})$$

Admitindo um sistema de eixos com origem no ponto de tangência trainel/concordância, tem-se a seguinte figura:

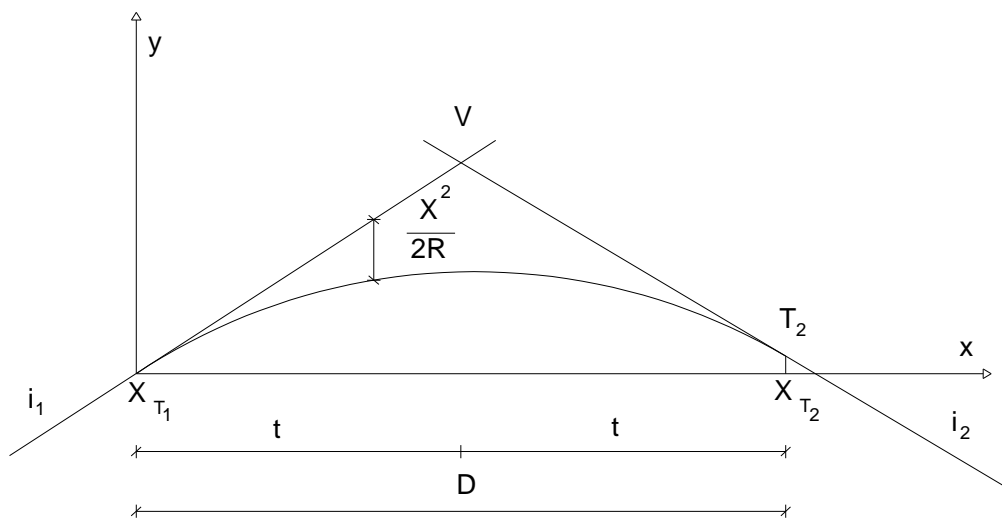


Fig.25 – Elementos de uma concordância vertical convexa.

Sendo linear a variação da inclinação, então a variação de  $y$  em função de  $x$  é de segundo grau e a concordância apresenta a forma de uma parábola. Considerando ainda que a origem dos eixos é no ponto de tangência trainel/concordância e a inclinação a primeira derivada de  $y$ , a fórmula anterior pode-se escrever da seguinte forma:

$$i = \frac{dy}{dx} = i_1 + \frac{x}{k_v}$$

Integrando-se a expressão anterior tem-se:

$$\begin{aligned} y &= \int i_1 + \frac{x}{K_v} dx \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow y &= i_1 \cdot x + \frac{x^2}{2K_v} \end{aligned} \quad (51)$$

Como foi deduzido no subcapítulo 3.1.5.3, sabe-se que a curvatura de uma função é dada por:

$$K = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}$$

E como,

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{K_v}$$

Então,

$$K = \frac{\frac{1}{K_v}}{\left[1 + \left(i_1 + \frac{x}{K_v}\right)^2\right]^{3/2}}$$

Calculando o máximo e o mínimo da função  $y$  ( $\frac{dy}{dx} = 0$ ):

$$x = -i_1 K_v$$

Então a curvatura neste ponto será:

$$K = \frac{1}{K_v}$$

Se a concordância for convexa, pela convenção matemática de sinais, a segunda derivada terá de ser negativa, sendo a curvatura igual a:

$$K = -\frac{1}{K_v}$$

Como o raio é o inverso da curvatura:

$$R = -K_v$$

Se a concordância for côncava, pela convenção matemática de sinais, a segunda derivada terá de ser positiva, sendo a curvatura igual a:

$$K = \frac{1}{K_v}$$

Como o raio é o inverso da curvatura:

$$R = K_v$$

Como a convenção rodoviária de sinais considera o raio das concordâncias côncavas negativo e o raio das concordâncias convexas positivo, multiplica-se por -1 a fórmula (51), chegando-se à equação final para uma concordância vertical:

$$y = i_1 x - \frac{x^2}{2R} \quad (52)$$

$i_1$  [m/m] – Inclinação do trainel de entrada (positivo a subir e negativo a descer);

$R$  [m] – Raio mínimo da concordância (positivo no caso das concordâncias convexas e negativo nas côncavas).



# 4

## PROJECTO DE EXECUÇÃO DE UM NÓ DE LIGAÇÃO EM TROMPETE

### 4.1. PREÂMBULO

Refere-se o presente estudo a um Projecto de Execução de um Nó de Ligação em Trompete na Especialidade de Geometria do Traçado. Este nó de três ramos procura estabelecer a ligação entre duas vias de geometria conhecida, tendo como objectivo melhorar a qualidade de serviço nesta zona. Para a concepção do nó de ligação foram fornecidos os seguintes elementos:

- Planta topográfica da zona à escala 1:1000, bem como a definição dos trajectos das vias que se intersectam desniveladas;
- Perfil longitudinal da estrada principal;
- Ocupação actual do solo.

Pretende-se que o seguinte Projecto Parcelar de Geometria do Traçado inclua uma Planta de Implantação do Nó de Ligação em Trompete, à escala 1:500, assim como os respectivos perfis longitudinais de cada um dos ramos e da estrada principal, à escala H=1:1000 e V=1:100.

O traçado dos ramos de ligação deverá respeitar a Norma de Nós de Ligação da Estradas de Portugal, sendo complementado pelas sebtas das disciplinas de Complementos de Estradas e Aeródromos e Vias de Comunicação I e II.

### 4.2. CONCEPÇÃO GERAL

Para a escolha do tipo de um nó de ligação interferem diversos factores relacionados com as características da rede viária local, com a área disponível e com os condicionamentos urbanísticos da zona.

Para a situação em que uma estrada se incorpora noutra perdendo a partir daí a continuidade, um Nó de Ligação em Trompete é o mais imediato e benéfico. Este tipo de nó é constituído por dois ramais de viragem à direita, um “loop” (forma curva e desenvolvimento angular de aproximadamente 300 graus) e um ramal semi-directo de viragem à esquerda. Geralmente, o ramal semi-directo de viragem à esquerda sai da estrada principal com uma primeira curva à direita. Porém, devido aos

condicionamentos urbanísticos da zona, achou-se que a melhor solução seria rebater o nó em torno da estrada secundária. O ramal semi-directo terá assim características de entrada na estrada principal, enquanto que o “loop” funcionará como um ramal de saída da estrada principal (de viragem à esquerda com uma primeira curva à direita). Esta solução traz certos condicionamentos que deverão ser tomados em atenção, como o caso da extensão da via de abrandamento de entrada no “loop”. A imagem seguinte esquematiza o tipo de nó de ligação a utilizar.

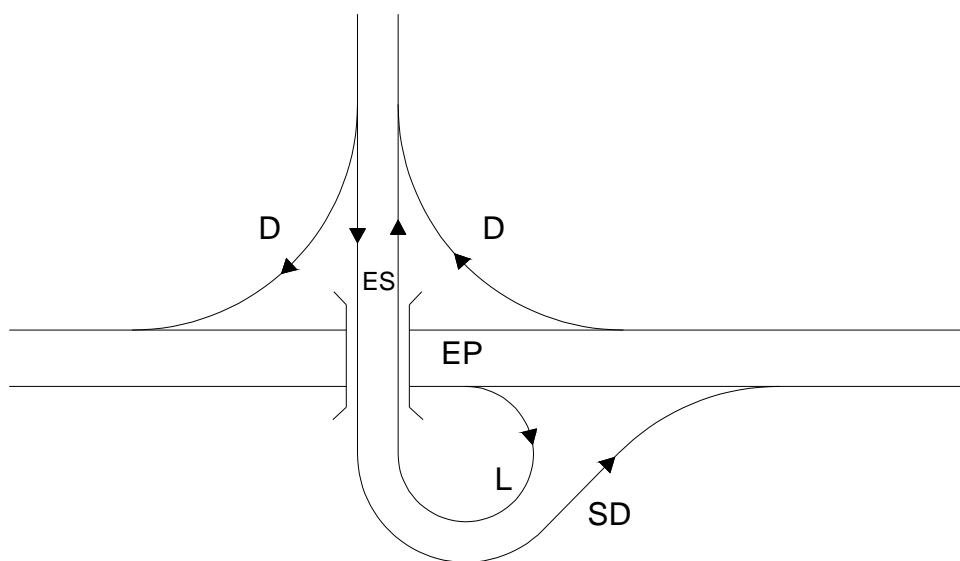


Fig.26-Esquema do tipo de nó em trompete a utilizar.

D – Ramal directo;  
SD – Ramal semi-directo;  
L – “loop”;  
ES – Estrada secundária;  
EP – Estrada Principal.

A geometria deste tipo de nó apresenta várias vantagens:

- Exige pouco espaço;
- Não apresenta entrecruzamentos na estrada secundária, o que lhe garante uma elevada capacidade de tráfego;
- As rampas de entrada na estrada principal estão depois da obra de arte;
- A rampa de saída de viragem à direita está antes da obra de arte;
- A sinalização é relativamente simples, devido à ausência de pontos de conflito;
- É um nó seguro que não induz os condutores a cometerem manobras erradas.



Como desvantagens apresentam-se as seguintes:

- A rampa de saída de viragem à esquerda está depois da obra de arte;
- A via de abrandamento correspondente à entrada no “loop” está sob a obra de arte (maior vão da obra de arte);
- O tráfego de saída da estrada principal para viragem à esquerda entra num loop.

Ao longo deste trabalho serão utilizadas designações para identificar cada um dos ramos do nó de ligação. De uma maneira geral, utilizam-se as seguintes nomenclaturas para os ramos de um nó de ligação em trompette:

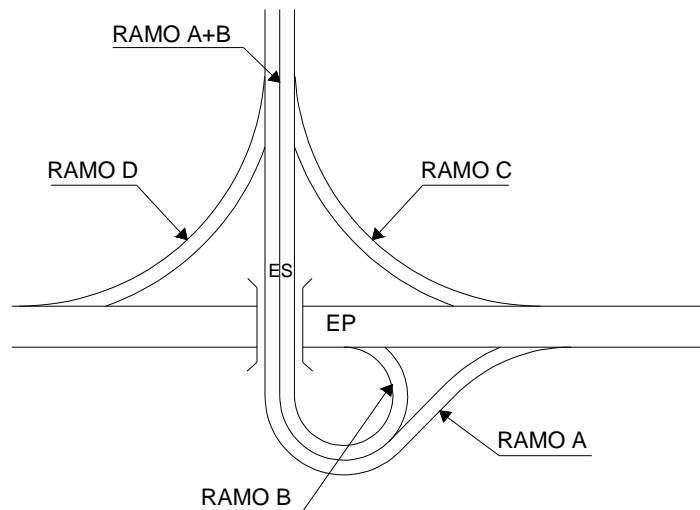


Fig.27-Designações dos ramos utilizadas.

### 4.3. CONDICIONANTES DO PROJECTO

#### 4.3.1. LIGAÇÕES À REDE LOCAL

A compatibilização do nó em estudo com a rede viária local sai fora do âmbito deste projecto. No entanto, fizeram-se duas alterações que irão restabelecer o tráfego do arruamento (Rua de Jaca) ao qual foi sobreposto o nó. Consideraram-se duas passagens inferiores: a passagem inferior 1 no ramo A+B e a passagem inferior 2 na estrada principal. Este novo restabelecimento será a continuação da rua da Serpente, intersectando a Rua de Jaca do lado sul do nó. Esta solução procura assegurar melhores condições de circulação local e garantir o desenvolvimento futuro da região envolvente. Na Planta de Implantação em Anexo (Desenho N°1), poderão ser observadas estas alterações.

#### 4.3.2. OBRA DE ARTE

O perfil transversal - tipo da estrada dever-se manter constante na zona do nó, para que os condutores não sejam desviados da sua atenção à estrada. A estrutura deverá ser concebida de forma a adaptar-se ao traçado do nó, tendo por base estudos detalhados para determinar se a estrada principal deva passar por cima ou por baixo da estrutura. A escolha da passagem da estrada principal foi condicionada essencialmente pela topografia do terreno. Ao adaptar-se o traçado à topografia local, a construção não terá um impacte ambiental tão significativo e os custos de execução e manutenção serão também menores. Como se pode observar na Planta Topográfica (Anexo – Desenho N°1), o terreno cresce em altitude para o lado norte. Por este motivo e, já que a obra de arte deverá estar na direcção sul - norte, o mais prático e económico é que a estrada principal passe por baixo da obra de arte. Além disso, a passagem superior facilita a desaceleração dos veículos que saem, e a aceleração dos que entram na estrada principal. Para o caso dos condutores da estrada principal é também vantajoso, pois estes não têm o desconforto das juntas e das possíveis reparações das mesmas. Apesar de o perfil longitudinal da estrada estar já definido, o ideal seria que fosse em escavação na zona da obra de arte, para que o atravessamento da via secundária se efectuasse o mais próximo do terreno, já para não falar da redução do efeito visual e poluição sonora. Contudo, o perfil longitudinal está apenas a um metro acima do solo na zona da obra de arte, pelo que o efeito visual causado por este motivo não terá qualquer relevância. A altura livre mínima acima do pavimento da estrada deverá ser de 5,00 metros, [2].

#### 4.3.3. NÚMERO DE VIAS

No caso em estudo, optou-se por três vias por sentido para a estrada principal. Considerando que a zona de implantação do nó de ligação se localiza na actual A29 – Estarreja/Porto que, segundo os dados da E.P., é a via mais saturada da Área Metropolitana do Porto devido ao elevado tráfego de pesados que a utilizam para fugir ao pagamento de portagens da A1, a escolha de três vias por sentido melhora substancialmente as condições operacionais, tanto ao nível de congestionamentos como da segurança.

#### 4.4. TRAÇADO EM PLANTA

##### 4.4.1. ESTRADA PRINCIPAL

##### 4.4.1.1. Velocidade específica

Considerando  $f_t \cdot Se = 0$ , a fórmula (3) poderá escrever-se na seguinte forma:

$$\frac{v^2}{3,6^2 \cdot R} - g \cdot Se = g \cdot f_t$$

Logo, pode-se dizer que a aceleração centrífuga não compensada pela sobrelevação é igual ao produto da aceleração da gravidade ( $g$ ) pelo coeficiente de aderência transversal ( $f_t$ ). As Normas de Traçado limitam a aceleração centrífuga não compensada pela sobrelevação a  $0,22g$ , por questões de segurança e comodidade:

$$g \cdot f_t \leq 0,22g \Rightarrow f_t \leq 0,22$$

Para a uma velocidade base de 100 Km/h o coeficiente de aderência transversal terá o valor de 0,144 ( $<0,22$ ) – [3]- e para um raio inferior a 900m a sobrelevação deverá ser de 7%, [2]. Então, sendo o raio da curva circular do eixo da estrada principal de 600m, calcula-se a velocidade específica máxima:

$$v \leq \sqrt{127.600 \cdot \frac{0,144 + 0,07}{1 - 0,144 \cdot 0,07}}$$
$$v \leq 118,9 \text{ Km/h}$$

Sendo assim, neste lanço da estrada principal limitar-se-á a velocidade a 100 Km/h (pelo lado da segurança). Dado este limite de velocidade, a estrada principal poderá ser uma via reservada a automóveis e motociclos com perfil de auto-estrada.

##### 4.4.1.2. Largura da faixa de rodagem

Para uma estrada de 2 x 2 vias, a largura da faixa de rodagem deverá ser de 7,0 m (3,5 m cada via), [4]. Mas, como se optou por três vias para cada faixa de rodagem, a largura total para cada faixa de rodagem é igual a 10,5 metros (3,5x3).

#### 4.4.1.3. Separadores

Para a separação das faixas de rodagem da estrada principal achou-se que o separador mais adequado era o do tipo flexível. Este poderá funcionar como:

- Reserva de largura para possíveis alargamentos das faixas de rodagem;
- Para a implantação dos pilares da obra de arte ou da sinalização vertical;
- Redução do risco de encandeamento em condução nocturna.

A parte central do separador deverá apresentar inclinações adequadas, de forma a garantir uma boa drenagem. Em Anexo (Desenho N°3.1), apresenta-se o pormenor referente ao separador escolhido para a estrada principal.

#### 4.4.1.4. Elementos característicos da directriz

A quilometragem e os parâmetros geométricos do eixo da estrada principal já estavam definidos inicialmente. Como zona influente do nó considerou-se a distância compreendida entre o quilómetro 3+500,000 e 4+225,000. Neste troço a estrada principal é constituída por uma curva circular, uma clotóide e um alinhamento recto.

No Anexo A.1.1 apresentam-se os elementos característicos da directriz assim como a listagem das coordenadas em planta referentes à estrada principal. A planta da Estrada Principal poderá também ser observada em Anexo (Desenho N°1).

#### 4.4.2. PARTICULARIDADES TEÓRICAS DOS RAMOS

A definição geométrica dos ramos dos nós faz-se:

- Pelo bordo direito do sentido de circulação, no caso dos ramos unidireccionais (Ramos A, B, C, D);
- Pelo eixo, nos ramos bidireccionais (Ramo A+B).

Para a definição geométrica dos ramos de ligação foram tidos em consideração vários tipos de situações:

- Situação 1 - “Loop” entre recta e clotóide – Ramo B;
- Situação 2 - Curva em “S” e clotóide de saída tangente a um alinhamento recto – Ramo A e Ramo C;
- Situação 3 - Curva ovóide e Curva em “S” – Ramo D;

O ramo A+B é constituído por situações mais simples e imediatas do que as anteriores, pelo que não se achou necessário a sua explicação.

De seguida, são explicadas as metodologias de cálculo para as diferentes situações.

#### 4.4.2.1. Situação 1- “Loop” entre recta e clotóide - Ramo B

Este caso aplica-se ao ramo B, já que a clotóide de entrada no “loop” intersectará a clotóide da estrada principal.

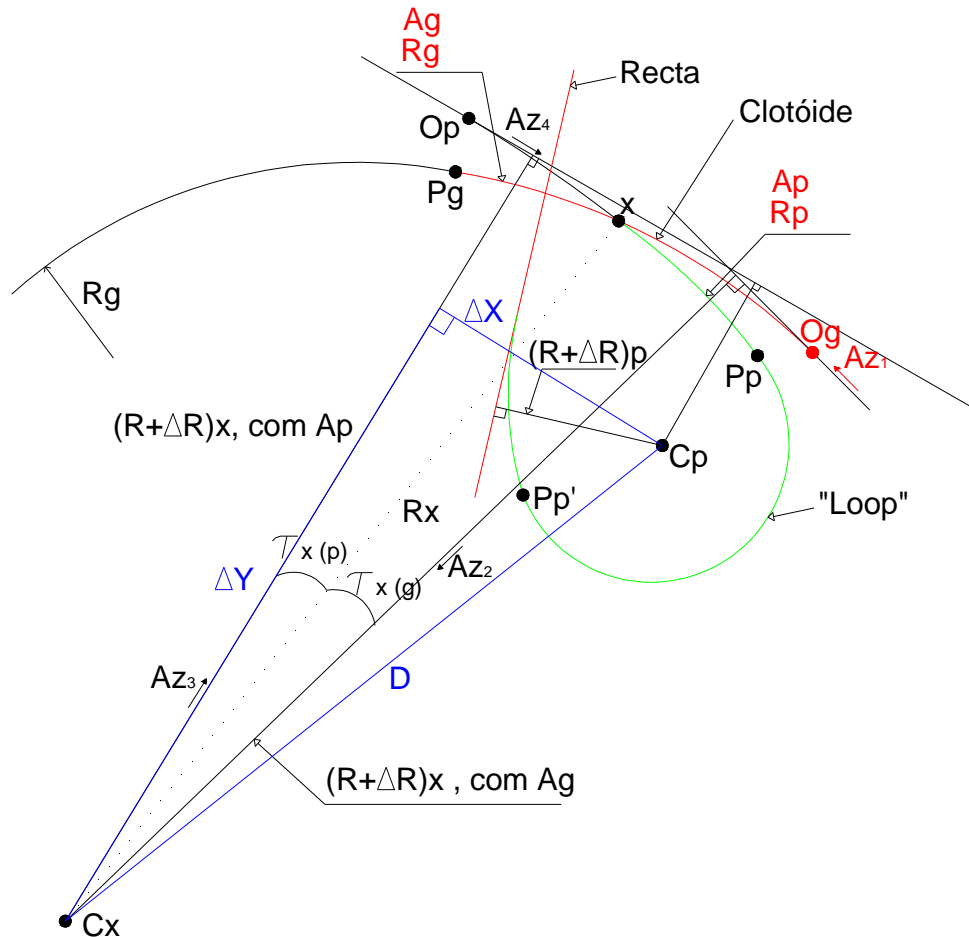


Fig. 28 – “Loop” entre recta e clotóide - Ramo B.

A cor vermelha representa os eixos conhecidos e a cor verde representa os eixos a determinar.

Dados:  $(Ag \text{ e } Rg)$  ;  $(Ap \text{ e } Rp)$ ; coordenadas de  $Og$  ;  $Az_1$ .

#### Usar o parâmetro $Ag$

1. Escolher um ponto genérico  $X$  da clotóide conhecida, pelo qual passará a clotóide de entrada no “loop”;
2. Calcular o raio e o ângulo  $\tau$  correspondente a esse ponto –  $(Rx \text{ e } \tau_x(g))$ ;
3. Calcular o centro  $Cx$ :

$$M_{Cx} = M_{Og} + XM_x \cdot \sin Az_1 + (R + \Delta R)_x \cdot \sin(Az_2)$$

$$P_{Cx} = P_{Og} + XM_x \cdot \cos Az_1 + (R + \Delta R)_x \cdot \cos(Az_2)$$

### Usar o parâmetro Ap

4. Calcular ângulo  $\tau$  corresponde ao ponto x ( $\tau x(p)$ ) ;

5. Calcular as coordenadas do ponto Op:

$$M_{Op} = M_{Cx} + (R + \Delta R_p)_x \cdot \sin(Az_3) + XM_x \cdot \sin\left(Az_3 - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$P_{Op} = P_{Cx} + (R + \Delta R_p)_x \cdot \cos(Az_3) + XM_x \cdot \cos\left(Az_3 - \frac{\pi}{2}\right)$$

6. Calcular as coordenadas do fim da clotóide correspondente à entrada no “loop”:

$$M_{Pp} = M_{Op} + X \cdot \sin(Az_4) + Y \cdot \sin\left(Az_4 + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$P_{Pp} = P_{Op} + X \cdot \cos(Az_4) + Y \cdot \cos\left(Az_4 + \frac{\pi}{2}\right)$$

7. Calcular o centro do “loop”. Para isso intersecta-se uma circunferência de centro Cx e raio D e uma circunferência de centro Pp e raio Rp.

$$D = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

$$\Delta x = XM_p - XM_x$$

$$\Delta y = (R_x + \Delta R_x) - (R_p + \Delta R_p)$$

$$\begin{cases} (x - M_{Cx})^2 + (y - P_{Cx})^2 = D^2 \\ (x - M_{Pp})^2 + (y - P_{Pp})^2 = R_p^2 \end{cases}$$

8. A distância entre o alinhamento recto e o centro do loop terá de ser maior que Rp, concretamente Rp+ΔRp. Sabendo o ΔRp, calcula-se o parâmetro A da clotóide de saída do “loop” através da seguinte equação\*:

$$A \cong \sqrt[4]{\Delta R \cdot 24R^3} \quad (53)$$

\* Repare-se que a equação do parâmetro A em função do ΔR é uma aproximação útil para a maioria dos cálculos práticos. A expressão exacta para o cálculo de ripagem (ΔR) é dada por:  $\Delta R = R \cdot (\cos \tau - 1) + y$

#### 4.4.2.2. Situação 2 - Curva em "S" e clotóide de saída tangente a um alinhamento recto – Ramo A e Ramo C

Esta situação particular aplica-se aos ramos A e C. Seja a seguinte figura:

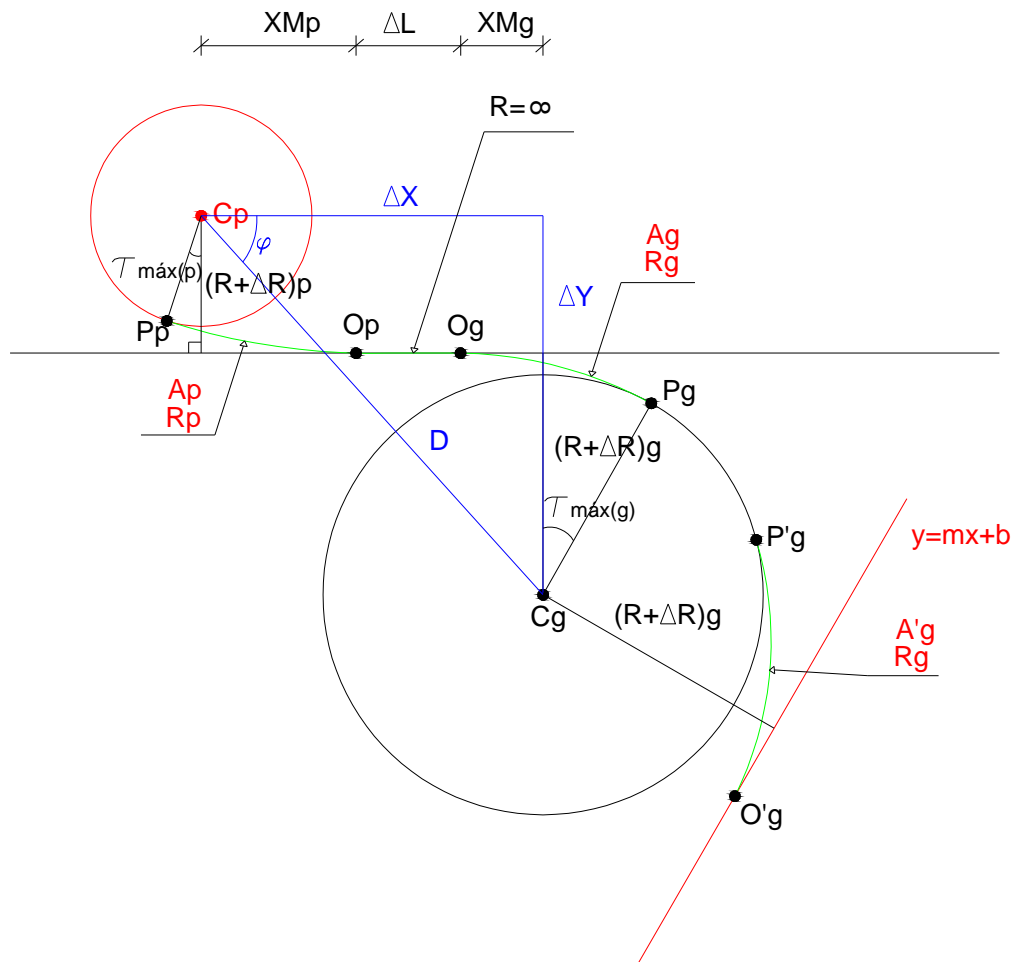


Fig.29- Curva em "S" e clotóide de saída tangente a um alinhamento recto – Ramo A e Ramo C.

Como na situação anterior, a cor vermelha representa os dados conhecidos e a cor verde representa o eixo a determinar.

Dados:  $(A_p \text{ e } R_p)$  ;  $(A_g, A'_g \text{ e } R_g)$ ; coordenadas de  $C_p$ ; equação  $y=mx+b$ .

Pela figura anterior, sabe-se que:

$$D = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

$$\Delta x = X_{Mp} + \Delta L + X_{Mg}$$

$$\Delta y = (R + \Delta R)_g + (R + \Delta R)_p$$

Para calcular as coordenadas do centro  $C_g$  intersectam-se uma circunferência de raio  $D$  e centro  $C_p$  e uma recta paralela a  $y=mx+b$  que dista  $(R + \Delta R)_g$  :

$$\begin{cases} (x - M_{Cp})^2 + (y - P_{Cp})^2 = D^2 \\ y = mx + b \pm \frac{R + \Delta R}{\cos(\arctg(m))} \end{cases}$$

Poderá não existir o alinhamento recto intercalar ( $\Delta L$ ), no entanto este torna-se importante para suavizar as inclinações longitudinais dos bordos da faixa.

#### 4.4.2.3. Situação 3 - Curva ovóide e Curva em "S"- Ramo D:

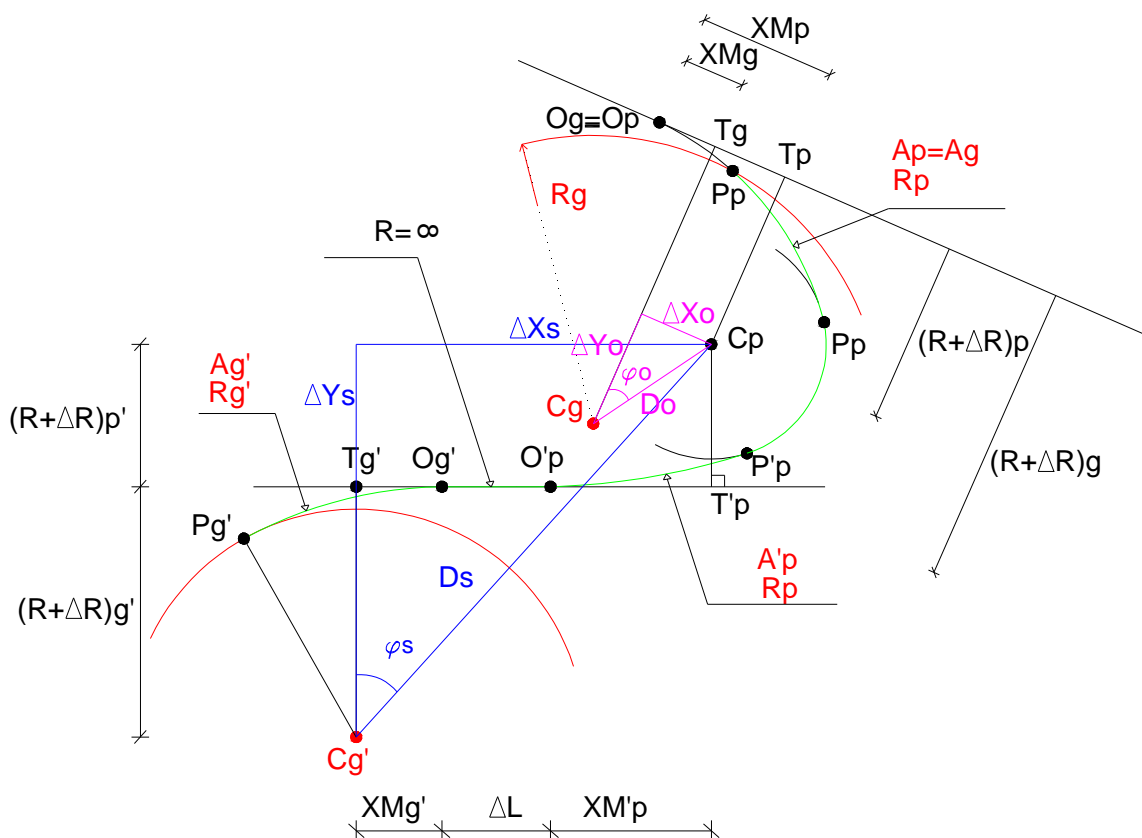


Fig.30- Curva ovóide e Curva em "S"- Ramo D.



Mais uma vez, a cor vermelha representa os dados conhecidos e a cor verde representa o eixo a determinar.

Dados:  $(A_g' \text{ e } R_g')$  ;  $(A_p' \text{ e } R_p)$ ;  $(A_p=A_g \text{ e } R_g)$ ; coordenadas de  $C_g'$  e  $C_g$ .

Sabe-se que para a curva em S:

$$D = \sqrt{(\Delta x_s)^2 + (\Delta y_s)^2}$$

$$\Delta x_s = XM_{g'} + \Delta L + XM'_p$$

$$\Delta y_s = (R + \Delta R)_{p'} + (R + \Delta R)_{g'}$$

Para a curva ovóide:

$$D = \sqrt{(\Delta x_0)^2 + (\Delta y_0)^2}$$

$$\Delta x_0 = XM_p - XM_g$$

$$\Delta y_0 = (R + \Delta R)_g - (R + \Delta R)_p$$

Para calcular as coordenadas do centro  $C_p$  intersectam-se uma circunferência de centro  $C_g'$  e raio  $D_s$  e outra de centro  $C_g$  e raio  $D_o$ :

$$\begin{cases} (x - M_{C_{g'}})^2 + (y - P_{C_{g'}})^2 = D_s^2 \\ (x - M_{C_g})^2 + (y - P_{C_g})^2 = D_o^2 \end{cases}$$

#### 4.4.3. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DOS RAMOS

Para uma melhor compreensão na definição dos elementos característicos dos ramos, as nomenclaturas usadas serão as mesmas das situações anteriores. A explicação de seguida apresentada deverá ser acompanhada da Planta de Implantação (Desenho N°1).



#### 4.4.3.1. Ramo B

##### a) Parâmetros Geométricos

A largura da faixa de rodagem da estrada principal será de 10,5 metros. Nesses 10,5 metros não está incluída a largura da via de abrandamento do ramo B, pelo que terão de ser adicionados 3,5 metros para a referida faixa, sendo a largura total de 14 metros (4x3,5).

Então, para determinar o raio da curva circular do bordo interior da estrada principal subtrai-se ao raio da curva circular do eixo da estrada principal metade do separador central, a berma de 1,0 metros e 4 x 3,5 metros:

$$R_g = 600 - 1,5 - 1,0 - 4.3,5 = 583,5 \text{ m}$$

Como consequência, o comprimento da clotóide será menor que 100 metros. O comprimento de um arco é dado pela multiplicação do raio pelo ângulo ao centro:

$$s = R \cdot \theta$$

Como o ângulo ao centro é o mesmo,

$$\theta = \frac{100}{600} = \frac{1}{6}$$

Então,

$$s = 583,5 \cdot \frac{1}{6} = 97,250 \text{ m}$$

No caso de uma clotóide, o raio é variável de infinito até ao raio mínimo no início da curva circular correspondente, pelo que o comprimento da clotóide poderá ser aproximado a:

$$L = 97,25 + \frac{(100 - 97,25)}{2} = 98,625 \text{ metros}$$

O parâmetro A é dado por:

$$A_g = \sqrt{r \cdot l} = \sqrt{583,5 \cdot 98,625} = 239,891 \text{ m}$$

Em relação ao raio da curva circular pequena, dadas as condições geométricas em planta já definidas (eixos do ramo A+B e da Estrada Principal), o raio escolhido foi de 45 metros.

Considerando uma aceleração centrífuga de 0,280.g (Quadro 1), a velocidade específica, para um raio igual a 45m, é calculada através da equação (3):

$$v \leq \sqrt{127.45.0,280} \cong 40 \text{ Km/h}$$

Considerando uma sobreaceleração radial de 1,058m/s<sup>3</sup> (Quadro 1) calcula-se o parâmetro A mínimo através da equação (7):

$$A \geq \sqrt{\frac{40.45}{46,656.1,058} \cdot \left(\frac{40^2}{45}\right)} \cong 36 \text{ m}$$

Note-se que este valor não é exacto, apenas indicativo, já que a sobrelevação considerada foi de 0%.

Sintetizando, os parâmetros geométricos do ramo B, segundo a nomenclatura da situação 1, são os seguintes:

$$A_g = 239,891 \text{ m}; R_g = 583,500 \text{ m}$$

$$A_p = 36,000 \text{ m}; R_p = 45,000 \text{ m}$$

Tendo por base os parâmetros anteriores calculados, determinaram-se os elementos característicos do ramo B através da metodologia explicada na situação 1. Após algumas tentativas, concluiu-se que o ponto para L=55 m era favorável à passagem da clotóide de entrada do “loop”. Tendo A<sub>g</sub> e L, calcula-se o raio R<sub>x</sub>:

$$R_x = \frac{239,891^2}{55} = 1046,322 \text{ m}$$

Em Anexo (A.1.2), apresentam-se os elementos característicos da directriz assim como a listagem das coordenadas em planta.

#### **b) Sobrelargura**

Para raios inferiores a 90 m deve-se adoptar sobrelarguras para os ramos, [1]. No presente ramo, como o raio é de 45 m, adoptou-se 1 m adicional, sendo a largura total de 5m.

**c) Via de abrandamento associada ao ramo**

Para a via de abrandamento do ramo B, seguiu-se a metodologia já explicada no capítulo (3.1.5.1). Assim:

- Velocidade da Estrada Principal: 100 Km/h;
- Velocidade Específica correspondente à curva circular de entrada: 40 Km/h;
- Extensão total (incluindo o “taper”): 110 m (N.E.);
- Extensão do “Taper”: 75 m (N.E.).

Calculando a extensão total pela equação (28):

$$d = \frac{v_i^2 - v_f^2}{254 \cdot (0,35 \pm 0,01i)} \cong 97\text{m} \leq 110\text{m (OK!)}$$

$$i = -1,664\% + \Delta i_1 = -1,664\% + \frac{15 \cdot (7 - 2,5)}{100} \cong -1\%$$

O final da via de abrandamento deverá ser no início da curva circular do ramo B (ponto que determina a velocidade de entrada). Contudo, como a via de abrandamento passa sob a obra de arte, optou-se por dar um acréscimo à extensão da via auxiliar, sendo o início do ramo B o ponto final para a via de abrandamento.

Para a construção do “taper” e, considerando a metodologia já explicada no capítulo 3.1.5.2, chegou-se aos seguintes valores:

$R=587,000$  m;

$A=3,500$  m;

$R_1=250,000\text{m}$  (arbitrado);

$R_2=974,723$  m (calculado).

As listagens das coordenadas do “taper” são apresentadas em Anexo (A.1.2).



#### 4.4.3.2. Ramo A

##### a) Parâmetros Geométricos

O ramo A tem a origem correspondente ao quilómetro 0+126,771 do ramo B. Como raio neste ponto não tem o mesmo valor para os dois ramos, é necessário somar ao raio de 45 m (ramo B), 5 m da largura do ramo B, 2,60 m das bermas e separador e mais 5 m da largura do ramo A:

$$R_p = 45 + 5 + 2,6 + 5 = 57,6 \text{ m}$$

Considerando uma aceleração centrífuga de 0,268.g (Quadro 1) a velocidade específica, para um raio igual a 57,6 m, é calculada através da equação (3):

$$v \leq \sqrt{127.57,6.0,268} \cong 45 \text{ Km/h}$$

Considerando uma sobreaceleração radial de 0,980 m/s<sup>3</sup> (Quadro 1) calcula-se o parâmetro A mínimo:

$$A \geq \sqrt{\frac{44.57,6}{46,656.0,980} \cdot \left(\frac{44^2}{57,6}\right)} \cong 43 \text{ m}$$

O parâmetro adoptado foi de 45m.

Quanto à curva circular maior (Rg), achou-se que um raio de 80 m seria o mais adequado.

Considerando uma aceleração centrífuga de 0,264g (Quadro 1) a velocidade específica, para um raio igual a 80m, é igual a:

$$v \leq \sqrt{127.80.0,264} \cong 50 \text{ Km/h}$$

Considerando uma sobreaceleração radial de 0,991 m/s<sup>3</sup> (Quadro 1) calcula-se o parâmetro A mínimo:

$$A \geq \sqrt{\frac{50.80}{46,656.0,991} \cdot \left(\frac{50^2}{80}\right)} \cong 50 \text{ m}$$

De forma a respeitar todos os condicionamentos em planta, o parâmetro adoptado foi de 45m, quando deveria ter sido no mínimo 50 m. Porém, ao adoptar-se um parâmetro de 45 m, continua a respeitar-se o grau de incomodidade permitido pelas Normas, como se demonstra de seguida.

O grau de incomodidade é dado por:

$$S_{an} = \frac{v^3}{46,656A^2} = \frac{50^3}{46,656 \cdot 45^2} = 1,32 \text{ m/s}^3$$

Como o grau de incomodidade é menor que  $1,5 \text{ m/s}^3$ , ainda se encontra dentro do limite de incomodidade. Apesar disso, poder-se-á limitar a velocidade neste ramo a 40 Km/h para que o grau de incomodidade diminua.

Em suma, têm-se os seguintes parâmetros geométricos, segundo a nomenclatura da situação 2 e no sentido crescente dos quilómetros:

$R_p = 57,600 \text{ m}$ ;

$A_p = A_g = 45,000 \text{ m}$ ;

$R_g = 80,000 \text{ m}$ ;

$A'_g = 45,000 \text{ m}$ ;

Tendo por base os parâmetros anteriores calculados, determinaram-se os elementos característicos do ramo A através da metodologia explicada na situação 2. Em Anexo (A.1.3), apresentam-se os elementos característicos da directriz assim como a listagem das coordenadas em planta.

#### **b) Sobrelargura**

Apesar de o raio da curva circular ser 80 m ( $< 90 \text{ m}$ ) não foi considerada sobrelargura, já que o valor apresentado pelas normas é de apenas 20 cm. Este pequeno valor não trará uma melhoria significativa para os veículos ao descreverem a curva. No início do ramo, devido ao raio ser substancialmente inferior ( $R=57,6\text{m}$ ), a sobrelargura considerada foi de 1m.

#### **c) Via de aceleração associada ao ramo**

Para a via de aceleração do ramo A, seguiu-se a metodologia já explicada no capítulo (3.1.5.1). Assim:

- Velocidade da Estrada Principal: 100 Km/h;
- Velocidade Específica da curva circular precedente: 50 Km/h;
- Extensão total (incluindo o “taper”): 176 m (N.E.);
- Extensão do “Taper”: 75 m (N.E.).

Calculando a extensão total pela equação (30):

$$d = \frac{v_f^2 - v_i^2}{254 \cdot (0,185 \pm 0,01i)} \cong 146 \text{ m} \leq 176 \text{ m (OK!)}$$

$$i = 1,664 \%$$



A extensão da via de aceleração começará a contar quando a distância da semi-recta perpendicular à bissectriz do ângulo formado pela divergência do ramo com a estrada principal tiver 1 metro. Este ponto é aproximadamente o fim da curva circular e, como foi mencionado anteriormente, o veículo poderá começar a acelerar.

Para a construção do “taper” e, considerando a metodologia já explicada no capítulo 3.1.5.2, chegou-se aos seguintes valores:

$a=3,500$  m;

$R_1=500,000$  m (arbitrado);

$R_2=305,321$  m (calculado).

As listagens das coordenadas do “taper” são apresentadas em anexo (A.1.3).



#### 4.4.3.3. Ramo A+B

##### a) Parâmetros Geométricos

O ramo A+B tem a origem correspondente ao quilómetro 0+126,771 do ramo B. Como o raio neste ponto não tem o mesmo valor para os dois ramos, já que a definição geométrica dos ramos “bidireccionais” é pelo eixo, é necessário somar ao raio de 45 m (ramo B), 5 m da largura do ramo B, 1,0 m da berma e metade da largura do separador:

$$R_p = 45 + 5 + 1,0 + 0,3 = 51,3 \text{ metros}$$

Repare-se que o bordo direito do início do ramo A+B ficou definido quando se definiu o ramo B (situação 1). Mas a definição geométrica do ramo A+B deverá ser pelo eixo e não pelo bordo direito. A distância entre o alinhamento recto conhecido e o centro do loop dará o novo  $R_p + \Delta R_p$ . Esta distância é facilmente calculada em planta:

$$R_p + \Delta R_p = 56,894 \text{ m}$$

Sabendo que  $R_p = 51,3 \text{ m}$ :

$$\Delta R_p = 56,894 - 51,3 = 5,594 \text{ m}$$

Então, está-se em condições de calcular o parâmetro A através da equação (53):

$$A \cong \sqrt[4]{\Delta R \cdot 24 R^3} = \sqrt[4]{5,594 \cdot 24 \cdot 51,3^3} = 65,249 \text{ m}$$

Considerando uma aceleração centrífuga de 0,274g (Quadro 1) a velocidade específica, para um raio igual a 51,3 m, calcula-se através da equação (3):

$$v \leq \sqrt{127 \cdot 51,3 \cdot 0,274} \cong 40 \text{ Km/h}$$

Relativamente aos outros elementos do ramo A+B são situações relativamente simples (clotóide entre alinhamento recto e curva circular), escolhendo-se os raios e os parâmetros A de forma a criar uma directriz capaz de ligar ao eixo de geometria conhecida, situado mais a norte. Foram tidos em atenção os condicionamentos urbanísticos, tentando contornar da melhor forma as edificações, nomeadamente a Estação de Tratamento de Águas. Deste modo, para a curva circular após a obra de arte, adoptou-se um raio de 120 m.

Considerando uma aceleração centrífuga de 0,236.g (Quadro 1) a velocidade específica, para um raio igual a 120 m, é igual a:

$$v \leq \sqrt{127.120.0,236} \cong 60 \text{ Km/h}$$

Considerando uma sobreaceleração radial de 0,823 m/s<sup>3</sup> (Quadro 1) calcula-se o parâmetro A mínimo:

$$A \geq \sqrt{\frac{60.120}{46,656.0,823} \cdot \left(\frac{60^2}{120}\right)} \cong 75 \text{ m}$$

Seguidamente, de forma a direccionar o ramo para o eixo de geometria conhecida, adoptou-se uma curva circular de raio 85 m, tendo as respectivas clotóides um parâmetro A de 50 m. Considerando que este troço do ramo deverá ter as características de uma estrada municipal, a velocidade base adoptada foi de 50 Km/h. Assim, o raio mínimo será determinado através da equação (3):

$$R = \frac{v^2}{3,6^2 \cdot 9,8} \cdot \frac{(1 - f_t \cdot Se)}{(Se + f_t)}$$

Considerando uma sobreelevação de 7% (para R < 450m segundo as N.T.) e um f<sub>t</sub> = 0,157, [3]:

$$R = \frac{50^2}{3,6^2 \cdot 9,8} \cdot \frac{(1 - 0,157 \cdot 0,07)}{(0,07 + 0,157)} \cong 85 \text{ m}$$

Sendo este também o raio preconizado pelas Normas de Traçado.

Considerando uma sobreaceleração radial de 0,5 m/s<sup>3</sup> (valor das N.T.), determina-se o parâmetro A mínimo através da equação (7):

$$A \geq \sqrt{\frac{50.85}{46,656.0,5} \cdot \left(\frac{50^2}{85} - 127.0,07\right)} \cong 61,0 \text{ m}$$

O parâmetro A adoptado foi de 65,0m.

**b) Sobrelargura**

No início do ramo A+B, visto que apresenta um raio de 51,3 m, adoptou-se uma sobrelargura de 1,0 metros. Em relação à curva circular de raio 85 m, as Normas de Traçado referem que, para raios inferiores a 200m, a sobrelargura introduzida no intradorso da curva deverá ter o valor de:

$$Sl = \frac{80}{R} \quad (54)$$

Para R=85 m:

$$Sl = \frac{80}{85} \cong 1,0 \text{ m}$$

**c) Número de Vias**

Após a convergência dos ramos C e D, o ramo A+B apresenta-se com duas vias por sentido. Devido à proximidade da P.I. 1, achou-se que o mais adequado era reduzir a faixa de rodagem para uma via por sentido e eliminar o separador central. Em Anexo (A.1.4) encontram-se as respectivas coordenadas dos pontos mais relevantes dessa transição.

**d) Bermas**

Após a transição para uma via por sentido achou-se que as bermas de largura 2,5 metros eram excessivas, pelo que se adoptou 1,5 metros de largura para ambas as bermas, [2].

**e) Separador**

O separador escolhido para o ramo A+B foi do tipo rígido (New Jersey). Este separador exige um menor espaço, tornando-se mais económico; é bastante resistente aos embates, sendo mais seguro no caso de invasão da faixa contrária e tem menores despesas de manutenção que o separador do tipo flexível. Em Anexo (Desenho N°3.2) apresenta-se o pormenor referente ao separador - tipo do ramo A+B.

Como foi referido, devido à P.I. 1, procedeu-se à passagem de duas vias para uma via por sentido com uma curva e contra-curva. Para o “encurtamento” do separador, a Norma de Intersecções refere que, no caso do separador se localizar num alinhamento recto, a transição deve efectuar-se por meio de uma curva e contra-curva, com um alinhamento recto intermédio. A figura seguinte esquematiza o modo como deverá ser “encurtado” o separador central, [4]:

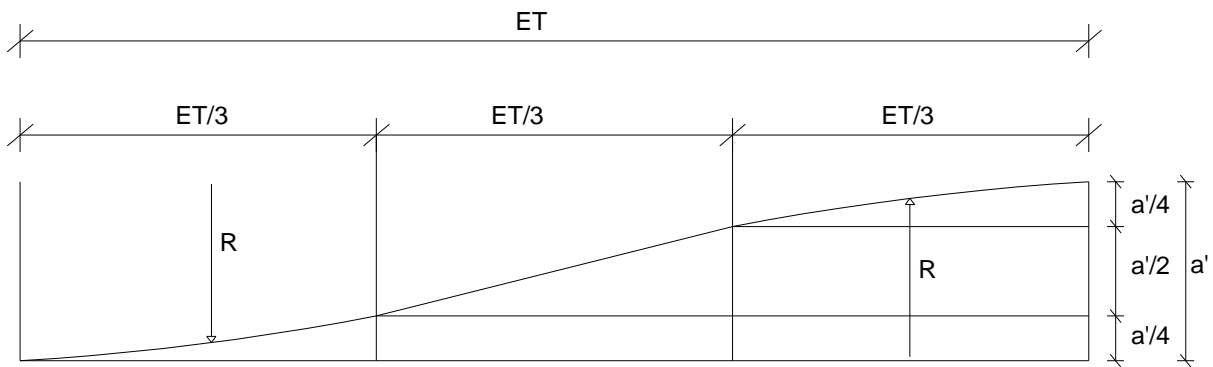


Fig. 31 – “Encurtamento” do separador.

$$\overline{ET} = V \cdot \sqrt{a'} \quad (55)$$

V [Km/h]– Velocidade base

a' [m]- Metade da largura do separador mais a berma.

Então,

$$\overline{ET} = 50 \cdot \sqrt{(0,3 + 1)} = 57 \text{ m}$$

O raio das curvas é dado pela seguinte expressão:

$$R = \frac{\overline{ET}^2}{4,5a'} \cong 555 \text{ m}$$

#### 4.4.3.4. Ramo C

##### a) Parâmetros Geométricos

O método construtivo do ramo C é exactamente igual à do ramo A. A única diferença é que são simétricos. A particularidade que merece mais atenção no caso do ramo C é a sua extensão. Como o ramo A+B passa a uma cota superior à da estrada principal, o ramo C deverá ter uma extensão considerável para que intersecte o ramo A+B sem que a inclinação longitudinal ultrapasse os limites das Normas. Definido o início do ramo C, adoptou-se um raio de 200 m. A Norma de Nós de Ligação refere valores máximos para a aceleração centrífuga apenas para raios inferiores a 120 m (Quadro 1), pelo que se adoptou uma aceleração centrífuga de 0,22g, limite das Normas de Traçado. A velocidade específica é calculada através da equação (3):

$$v \leq \sqrt{127.200.0,22} \cong 75 \text{ km/h}$$

Considerando uma sobreaceleração radial de  $1,0 \text{ m/s}^3$  ( $< 1,5 \text{ m/s}^3$ ) calcula-se o parâmetro A mínimo:

$$A \geq \sqrt{\frac{75.200}{46,656.1,0} \cdot \left(\frac{75^2}{200}\right)} \cong 95 \text{ m}$$

Devido aos condicionamentos em planta já existentes, nomeadamente as geometrias do ramo A+B e da estrada principal, chegou-se à conclusão que as clotóides de entrada e a de saída referentes à curva circular de raio 200 m deveriam ter, respectivamente, parâmetros de 140 m e 110 m (ambos maiores que 95m)

Relativamente ao raio do ponto final do ramo, é necessário somar aos 120 m (raio do ramo A+B), metade do separador e as larguras da berma e das vias:

$$R_p = 120 + 0,3 + 1,0 + 7,0 = 128,300 \text{ m}$$

A velocidade específica correspondente a este raio é:

$$v \leq \sqrt{127.128,3.0,22} \cong 60 \text{ km/h}$$

Então, considerando igualmente uma sobreaceleração radial de  $1,0 \text{ m/s}^3$ , calcula-se o parâmetro A mínimo:

$$A \geq \sqrt{\frac{60.128,3}{46,656.1,0} \cdot \left(\frac{60^2}{128,3}\right)} \cong 68 \text{ m}$$

O parâmetro A escolhido foi de 70 m. Entre as clotóides da curva em “S” colocou-se ainda um alinhamento recto para suavizar as inclinações longitudinais.

Sintetizando, os parâmetros geométricos adoptados, segundo a nomenclatura da situação 2 e no sentido crescente dos quilómetros, foram os seguintes:

$$Ag'=140,000m;$$

$$Rg=200,000m;$$

$$Ag=110,000m;$$

$$Ap=70,000m;$$

$$Rp=128,300m.$$

Tendo por base os parâmetros anteriores calculados, determinaram-se os elementos característicos do ramo C através da metodologia explicada na situação 2. Em Anexo (A.1.5), apresentam-se os elementos característicos da directriz assim como a listagem das coordenadas em planta.

#### b) Sobrelargura

Como os raios são superiores a 90 m não foi considerada qualquer sobrelargura, [1].

#### c) Via de abrandamento associada ao ramo

Para a via de abrandamento do ramo C, seguiu-se a metodologia já explicada no capítulo (3.1.5.1). Assim:

- Velocidade da Estrada Principal: 100 Km/h;
- Velocidade Específica correspondente à curva circular de entrada: 75 Km/h;
- Extensão do “Taper”: 75 m (N.E.).

Segundo as N.E., a extensão total da via de aceleração deverá ser cerca de 77 m (valor calculado por interpolação).

Considerando um disfarce linear, apesar de ser parabólico, para o bordo do extradorso da estrada principal e considerando ainda que este disfarce afecte toda a via de abrandamento, pelo lado da segurança, o  $\Delta i$  é dado por:

$$\Delta i = \frac{(Se + i) \cdot a}{L'} = \frac{(7 + 2,5) \cdot 15}{150,66} \cong 1,0 \%$$

$$L' = L + L_d \text{ (Fig. 20)}$$

$$L' = 100m;$$

$$L_d = 0,336251 \cdot L' \text{ (equação(37), com } Se = 7\% \text{ e } i = 2,5\%);$$

Então,

$$i = -1,664 - \Delta i = -1,664 - 1,0 = -2,664 \%$$



Calculando a extensão total pela equação (28):

$$d = \frac{v_f^2 - v_i^2}{254 \cdot (0,185 \pm 0,01i)} \cong 110\text{m} \geq 77 \text{ (KO!)}$$

A extensão total deverá ser no mínimo 110 m e não os 77 m dados pelas Normas Espanholas.

Sendo a extensão da clotóide de entrada elevada, achou-se que o fim do “taper” poderá ser coincidente com o início do ramo C, não havendo quaisquer problemas de visibilidade e sempre diminui os custos de construção. Além disso, medindo a extensão da via de abrandamento, incluindo o “taper”, até que a distância da semi-recta perpendicular à bissectriz do ângulo formado pela divergência do ramo com a estrada principal seja 1 metro, chega-se a um valor de 132 metros, o que é superior aos 110 metros.

Para a construção do “taper” e, considerando a metodologia já explicada no capítulo 3.1.5.2, chegou-se aos seguintes valores:

$a=3,500$  m;

$R_1=300,000$  m (arbitrado);

$R_2=505,321$  m (calculado).

As listagens das coordenadas do “taper” são apresentadas em Anexo (A.1.5).



#### 4.4.3.5. Ramo D

##### a) Parâmetros Geométricos

O método construtivo para o ramo D foi baseado na situação 3 - Curva ovóide e Curva em “S”.

##### *Curva Ovóide:*

O raio da curva grande (Rg), correspondente ao ponto inicial do ramo, foi determinado em função do raio do ramo A+B. Para isso, subtraíu-se aos 120 m, metade do separador, a largura da berma e a das vias:

$$R_g = 120 - 0,3 - 1,0 - 7,0 = 111,7 \text{ m}$$

Considerando uma aceleração centrífuga de 0,22.g, calcula-se a velocidade específica para um raio de 111,7 m através da equação (3):

$$v \leq \sqrt{127.111,7.0,22} \cong 55 \text{ km/h}$$

Considerando uma sobreaceleração radial de 1,0 m/s<sup>3</sup>, calcula-se o parâmetro A mínimo:

$$A \geq \sqrt{\frac{55.111,7}{46,656.1,0} \cdot \left(\frac{55^2}{111,7}\right)} \cong 60 \text{ m}$$

Após algumas tentativas, chegou-se à conclusão que o valor de 50 m para o raio mais pequeno (Rp) era o mais aconselhável. Considerando igualmente uma aceleração de 0,22.g, calcula-se a velocidade específica para um raio de 50 m:

$$v \leq \sqrt{127.50.0,22} \cong 40 \text{ km/h}$$

Para uma sobreaceleração radial de 1,0 m/s<sup>3</sup>, calcula-se o parâmetro A mínimo:

$$A \geq \sqrt{\frac{40.50}{46,656.1,0} \cdot \left(\frac{40^2}{50}\right)} \cong 37 \text{ m}$$

O parâmetro Ap=Ag deverá ser o maior dos dois, pelo que o escolhido foi o de 60 m.

### Curva em “S”:

A clotóide de saída da curva circular de raio  $R_p=50$  m, de acordo com a fórmula anterior, deverá ter um parâmetro  $A$  maior que 37 m. Devido aos vários factores intervenientes nesta construção geométrica, chegou-se à conclusão que um parâmetro  $A'_p$  de 70 m ( $>37$  m) satisfazia os critérios de segurança do ramo.

Em relação à clotóide final que intersecta a estrada principal, dificilmente se consegue respeitar o critério de comodidade e segurança, já que ao raio da estrada principal estará associado um parâmetro  $A$  muito elevado. Além disso, esse parâmetro deverá ser respeitado se todo o troço considerado fosse do mesmo tipo, isto é, ou ramo de um nó ou pleno traçado e não numa situação de confluência, como se verifica neste caso. Por este motivo, o valor do parâmetro  $A$  não fica sujeito às condicionantes do pleno traçado, admitindo-se valores mais pequenos. De modo a ter-se algum critério de escolha para o parâmetro  $A$ , sabe-se que numa curva em “S” os parâmetros das clotóides deverão respeitar a seguinte relação:

$$\frac{2}{3} \leq \frac{A_1}{A_2} \leq \frac{3}{2}$$

Sabendo que o parâmetro  $A'_p = 70$  m, ao escolher-se um parâmetro  $A'_g=100$  m está-se a respeitar a relação anterior, pelo que foi este o adoptado.

Mais uma vez, para suavizar as inclinações longitudinais, considerou-se um alinhamento recto intercalar.

Sintetizando, os parâmetros geométricos adoptados foram os seguintes, segundo a nomenclatura da situação 3 e no sentido crescente dos quilómetros:

$R_g=111,700$  m;

$A_g=A_p=60,000$  m;

$R_p=50,000$  m;

$A'_p=70,000$  m;

$A'_g=100,000$  m;

$R'_g=616,5$  m.

Tendo por base os parâmetros anteriores calculados, determinaram-se os elementos característicos do ramo D através da metodologia explicada na situação 3. Em Anexo (A.1.6), apresentam-se os elementos característicos da directriz, assim como a listagem das coordenadas em planta.

### b) Sobrelargura

Para a curva circular de raio 50 m ( $< 90$ m), adoptou-se uma sobrelargura de 1,0 m, sendo a largura total de 5,0 m.

**c) Via de aceleração associada ao ramo**

Para a via de aceleração do ramo D, seguiu-se a metodologia explicada no capítulo (3.1.5.1). Assim:

- Velocidade da Estrada Principal: 100 Km/h;
- Velocidade Específica da curva circular precedente: 40 Km/h;
- Extensão total (incluindo o “taper”): 200 m (N.E.);
- Extensão do “Taper”: 75 m (N.E.).

Calculando a extensão total pela seguinte fórmula:

$$d = \frac{v_f^2 - v_i^2}{254 \cdot (0,185 \pm 0,01i)} \cong 196 \text{ m} \leq 200 \text{ m (OK!)}$$

$$i = -1,664 \%$$

Como foi mencionado no capítulo (3.1.5.1), o veículo pode começar a acelerar imediatamente depois da curva circular, desde que tenha visibilidade. No caso do ramo presente, devido à extensão da clotóide, o veículo ao sair da curva circular não tem boa visibilidade sobre a estrada principal, pelo que a extensão da via de aceleração deverá começar a ser medida quando a distância da semi-recta perpendicular à bissectriz do ângulo formado pela divergência do ramo com a estrada principal for 1 metro.

Para a construção do “taper” e, considerando a metodologia já explicada no capítulo 3.1.5.2, chegou-se aos seguintes valores:

$a=3,500 \text{ m}$ ;

$R_1=290,000 \text{ m}$  (arbitrado);

$R_2=432,742 \text{ m}$  (calculado).

As listagens das coordenadas do “taper” são apresentadas em anexo (A.1.6).



## 4.5. TRAÇADO EM PERFIL LONGITUDINAL

### 4.5.1. ESTRADA PRINCIPAL

Para um raio inferior a 900 m, a sobrelevação deverá ser de 7%. Quanto à sobrelargura só deverá ser considerada para raios menores ou iguais a 200 m, [2]. Sabendo que o raio da curva circular do eixo da estrada principal é de 600 m, então:

$$Se=7\%$$

$$Sl=0 \text{ m}$$

#### 4.5.1.1. Faixa interior (intradorso)

Para a faixa interior, o disfarce deve ser linear. Esta situação foi particularmente importante, como se viu no caso do ramo B.

#### 4.5.1.2. Faixa exterior (extradorso)

Para o disfarce de sobrelevação da estrada principal foi utilizado um modelo parabólico para a faixa externa (ver capítulo 3.1.5.3), sendo o valor de  $L_d$  dado pela equação (37):

$$L_d^3 - \frac{3}{2}L' \cdot L_d^2 + \frac{i \cdot L'^3}{2 \cdot (Se + i)} = 0$$

Sabendo que para a estrada principal  $Se=7\%$  e  $i=2,5\%$ , então:

$$L_d = 0,336251 \cdot L'$$

A equação (38) permite determinar a inclinação num ponto genérico:

$$\frac{dS_x}{dx} = (Se + i) \left[ \frac{6x}{L'^2} - \frac{6x^2}{L'^3} \right]$$

O ponto crítico para o risco de aquaplanagem é aquele em que a inclinação transversal é igual a zero (ponto de osculação recta/clotóide). Assim, é importante maximizar a inclinação longitudinal para que não ocorra esse risco.

Substituindo  $x = Ld$  na fórmula anterior tira-se a inclinação longitudinal do bordo exterior no ponto crítico (ponto de osculação recta/clotóide):

$$\frac{dSx}{dx} = (Se + i) \left[ \frac{6.0,336251.L'}{L'^2} - \frac{6(0,336251.L')^2}{L'^3} \right]$$

$$\frac{dSx}{dx} = \frac{(Se + i)}{L'} \cdot 1,34$$

$$\therefore \delta_{\text{parabólico}} = \frac{(Se + i)a}{L'} \cdot 1,34$$

Caso se considerasse um disfarce linear, pelo esquema da inclinação relativa dos bordos da faixa de rodagem (Fig.3), ter-se-ia:

$$\delta_{\text{linear}} = \frac{(Se + i).a}{L'}$$

Então conclui-se que,

$$\delta_{\text{parabólico}} = \delta_{\text{linear}} \cdot 1,34$$

Através da fórmula anterior pode-se afirmar que, ao utilizar um disfarce parabólico para uma sobreelevação de 7%, se conseguiu um aumento de 34% de declive relativamente ao do disfarce linear no ponto crítico para o risco de aquaplanagem.

### Verificação da Visibilidade

O comprimento da clotóide do eixo principal (L) é igual a 100m. Então:

$$L' = L + Ld = 100 + 0,336251L' \Leftrightarrow L' = 150,66 \text{ m}$$



Através da equação (41), calcula-se o raio mínimo do bordo exterior para o extradorso:

$$R = - \frac{\left[ 1 + \left( (Se + i) \left( \frac{6x}{L'^2} - \frac{6x^2}{L'^3} \right) \right)^2 \right]^{3/2}}{(Se + i) \left( \frac{6}{L'^2} - \frac{12x}{L'^3} \right)}$$

Sendo  $X=L'=150,66$  m ,  $Se=7\%$  e  $i=2,5\%$  tem-se:

$R_{min}= 39822$  m (convexo)

Para  $X=0$  ter-se-á, obviamente:

$R_{min}= -39822$  m (côncavo)

Dado o valor elevado do raio mínimo, não haverá problema para a adopção do disfarce parabólico. Isso será comprovado no subcapítulo relacionado com o perfil longitudinal do ramo C.

#### 4.5.1.3. Elementos característicos da rasante

O perfil longitudinal do eixo da estrada principal já estava definido inicialmente. Como zona influente do nó considerou-se a distância compreendida entre o quilómetro 3+500,000 e 4+225,000. Neste troço a estrada principal é constituída por uma concordância côncava com o desenvolvimento de 200,0m, sendo o seu vértice coincidente com o quilómetro 3+500,000. Seguidamente, existe um trainel em declive com uma inclinação de 1,6638%.

Em Anexo (A.2.1), apresentam-se os elementos característicos da rasante, assim como a listagem das cotas de 25 em 25 metros. O perfil longitudinal pode ser observado também em Anexo (Desenho N°2.1).



#### 4.5.2. PARTICULARIDADES TEÓRICAS DOS RAMOS

As principais condicionantes no perfil longitudinal dos ramos são os valores das cotas a respeitar nas zonas de confluência com a estrada principal e com a estrada secundária. De forma a não haver qualquer quebra nessas zonas, procurou-se garantir uma continuidade da sobrelevação. O principal condicionamento que se coloca é na zona da “cunha”. Como a largura não é constante, as cotas dos pontos projectados para o início/fim do ramo não serão colineares, devendo fazer-se uma aproximação. Assim sendo, determinaram-se as cotas de três pontos característicos (no início/fim do ramo, na zona do “nariz” e outro intermédio) para cada confluência. Além disso, respeitou-se sempre a inclinação precedente e seguinte no começo e fim do ramo, respectivamente.

De seguida, apresenta-se um esquema que explica a forma para a determinação da rasante a passar nos três pontos escolhidos.

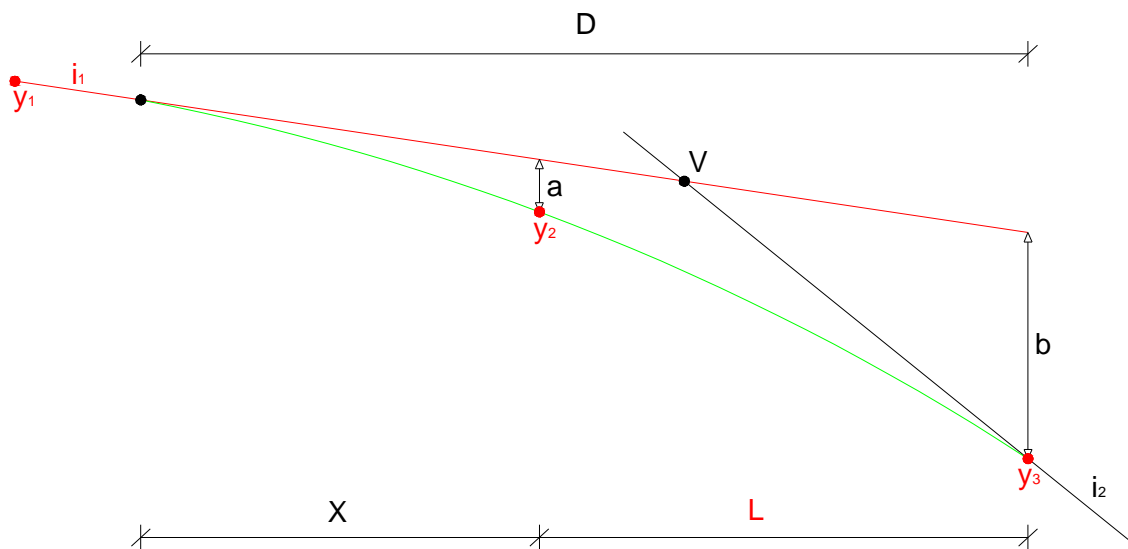


Fig. 32-Construção de uma concordância a passar em três pontos.

A cor vermelha representa os dados conhecidos e a cor verde representa a concordância a determinar.

Sabendo a inclinação do trainel de entrada e as cotas  $y_2$  e  $y_3$  determinam-se as distâncias  $a$  e  $b$ . Através do seguinte sistema de equações determina-se o raio mínimo da concordância vertical:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x^2}{2R} = a \\ \frac{(x + L)^2}{2R} = b \end{array} \right.$$

#### 4.5.2.1. Concordâncias

De acordo com o capítulo 3.2.2, os raios mínimos a respeitar para as concordâncias verticais são dados pelas fórmulas seguintes.

Concordâncias convexas:

$$R \geq \frac{Dv^2}{4}$$

Concordâncias côncavas:

$$R = \frac{Dv^2}{1,2 + 0,035 \cdot Dv} \quad (v \leq 80 \text{ Km/h})$$

$$R = \frac{v^2}{3,24} \quad (v \geq 80 \text{ Km/h})$$

Para o caso de estradas de faixas de rodagem unidireccionais, o veículo deverá poder visualizar o obstáculo a uma distância pelo menos igual à mínima distância de visibilidade de paragem ( $D_p$ ), de forma a efectuar a paragem com segurança após o ter visualizado. Então, a distância de visibilidade ( $D_v$ ) será igual à distância de paragem ( $D_p$ ), dada pelo Quadro 6.

Normalmente, nos ramos de ligação, a velocidade base varia entre 40 Km/h e 80 Km/h. No caso das concordâncias côncavas, o critério mais condicionante é o da visibilidade nocturna. Visto que o valor do raio mínimo dado pela fórmula das concordâncias côncavas é um pouco elevado para o caso dos nós de ligação, optou-se por utilizar o raio mínimo das concordâncias convexas para todas as concordâncias.

#### 4.5.2.2. Trainéis

##### a) *Inclinações Máximas*

Segundo a Norma de Nós de Ligação, as inclinações máximas desejáveis para os ramos de ligação são as estabelecidas no Quadro 5.

##### b) *Inclinações Mínimas*

A inclinação mínima dos trainéis será de 0,5% (ver capítulo 3.2.1.2)

#### 4.5.3. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DOS RAMOS

##### 4.5.3.1. Ramo B

Considerando que a velocidade específica determinada para o raio de 45m foi de 40 Km/h, optou-se por ser este o limite de velocidade em todo o ramo. Para uma velocidade de 40 Km/h a distância mínima de paragem será de 40m. Posto isto, o raio mínimo para as concordâncias verticais é:

$$R_{\min} = \frac{40^2}{4} = 400\text{m}$$

##### a) Condicionantes da Rasante

Neste ramo, só a parte inicial é que tem as cotas fixas, pelo que os pontos característicos escolhidos foram:

- Ponto inicial do ramo;
- Ponto do início da curva circular;
- Ponto correspondente ao “nariz”.

Em Anexo (A.2.2), encontram-se as cotas determinadas para os pontos escolhidos.

Para a inclinação inicial do ramo B, deve-se respeitar a inclinação precedente do bordo de intradorso da estrada principal. Como o início do ramo B coincide com a zona da clotóide do eixo da estrada principal e sabendo pela Fig.3 que a inclinação é dada por:

$$i = d - \Delta i_1$$

Com,

$$\Delta i_1 = \frac{a \cdot (Se - i)}{L}$$

Então, no início deste ramo, a distância do eixo de rotação ao bordo (a) é igual a:

$$a = 4,3,5 + 1,0 = 15,0 \text{ m}$$

Então,

$$\Delta i_1 = \frac{15 \cdot (7 - 2,5)}{100} = 0,675\%$$

A inclinação do bordo de intradorso no início do ramo b é igual a:

$$i = -1,664 + 0,675 \cong -1,0\%$$

Sintetizando, os elementos a respeitar para o ramo B são os seguintes:

Inclinação Inicial (%) : -1,00

Quadro 7-Pontos a respeitar para o ramo B.

	KM	Se(%)	Z(m)
Início do ramo B:	0+000,000	5,00%	129,85
Início da Curva Circular:	0+28,800	3,68%	129,45
“Nariz”:	0+36,100	3,23%	129,23

#### b) Definição da Rasante

Seguindo a construção exemplificada na Fig. 32, determinaram-se as características da primeira concordância:

$R=877,482$  m

$D=21,320$  m

De forma a aproximar a rasante o mais próximo do terreno, optou-se por uma segunda concordância tangente à primeira de desenvolvimento 40,0 m. Tendo alguma margem de manobra, optou-se por este desenvolvimento para assegurar o conforto óptico dos condutores. As características da segunda concordância são, então, as seguintes:

$R=-446,775$  m

$D=40,000$  m

A inclinação do último trainel foi escolhida de forma a aproximar a rasante ao perfil do terreno, adoptando-se uma inclinação de 5,52% (< 8%).

Em Anexo (A.2.2), apresentam-se os elementos característicos da rasante, assim como a listagem das cotas de 25 em 25 metros.

#### c) Sobrelevação

Para um raio de 45 m e uma velocidade de 40 Km/h a sobrelevação deverá estar entre 4% a 12%, [1]. A sobrelevação a adoptar deverá ser relativamente baixa para que seja mais fácil respeitar as cotas dos pontos característicos escolhidos. Deste modo, escolheu-se 5% para a curva circular de 45 m. Para respeitar a sobrelevação da estrada principal, o ponto característico do ramo correspondente ao “nariz” terá uma sobrelevação de 3,23 %. Como neste ponto a inclinação transversal é maior que 2,5% a drenagem está, à partida, garantida. De qualquer modo, para atingir os 5%, optou-se por uma variação da sobrelevação maior do que a mínima:

$$\Delta Se(\%) = 20 \cdot \frac{(5 - 3,23)}{15} = 2,36\%/20m > 2\%/20m$$

A variação máxima da sobrelevação deverá ser limitada consoante a velocidade no ramo, [1]. Para uma velocidade de 40 Km/h a variação máxima permitida é de 4,7%/20 m (ver Quadro 4)

Então:

$$2\% \leq 2,36\% \leq 4,7\%$$

Os 2,36% escolhidos respeitam ambos os critérios.

Em Anexo (Desenho N°2.2) apresenta-se o perfil longitudinal referente ao ramo B.





#### 4.5.3.2. Ramo A

Considerando que a velocidade específica mínima do ramo A é 40 Km/h (Raio =57,6 m), optou-se por ser este o limite de velocidade em todo o ramo. Para uma velocidade de 40 Km/h a distância mínima de paragem será de 40 m (ver Quadro 6). Então, o raio mínimo para as concordâncias verticais é:

$$R_{min} = \frac{40^2}{4} = 400m$$

##### a) Condicionantes da Rasante

Inicialmente o ramo A terá de respeitar a cota do fim do ramo B acrescida da sobrelevação:

$$Z_i = Z_B + 6. Se_B + 6. Se_{Ai}$$

Para a zona do separador, a inclinação será 0%. Quanto à sobrelevação inicial do ramo A será a mesma que a do ramo B (5%). Assim:

$$Z_i = 132,446 + 6,005 + 6,005 = 133,05$$

Em relação à parte final do ramo A, os pontos característicos escolhidos foram:

- Ponto correspondente ao “nariz”;
- Ponto do início da clotóide;
- Ponto final.

Em Anexo (A.2.3), encontram-se as cotas determinadas para os pontos escolhidos. A inclinação inicial para o ramo A deverá ser a mesma da do fim do ramo B. Quanto à inclinação final deverá ser a mesma da do eixo da estrada principal, já que a zona de confluência está em alinhamento recto. Sintetizando, os elementos a respeitar para o ramo A são os seguintes:

Inclinação Inicial (%) : -5,520%

Inclinação Final (%) : -1,664%

Quadro 8-Pontos a respeitar para o ramo A

Designação	KM	Se(%)	Z(m)
Início do Ramo	0+000,000	-5,00	133,05
“Nariz”:	0+122,290	2,50	127,90
Início da Clotóide:	0+137,903	2,50	127,73
Fim do Ramo:	0+163,216	2,50	127,33

### b) Definição da Rasante

Para a parte final do ramo, seguiu-se a construção exemplificada na Fig. 32, chegando-se aos seguintes valores:

$$R=3419,956$$

$$D=27,424$$

Estando definida a inclinação do trainel inicial, optou-se por uma concordância que seja tangente ao ponto inicial da C.V.2. Assim, obtiveram-se os seguintes valores:

$$R=-1475,055$$

$$D=68,712$$

Em Anexo (A.2.3), apresentam-se os elementos característicos da rasante assim como a listagem das cotas de 25 em 25 metros.

### c) Sobrelevação

A sobrelevação inicial deverá ser a mesma que a do ramo B, o que garante uma certa uniformidade, apesar de serem duas faixas de rodagem separadas. Quanto à curva circular de raio 80 m, a Norma de Nós de Ligação refere que a sobrelevação deverá estar entre, aproximadamente, 3% a 7%, pelo que o escolhido foi 5%. Contudo, no ponto do ramo correspondente ao “nariz” da confluência, a sobrelevação deverá respeitar a da estrada principal, cujo valor é de 2,5%.

Sabendo que a sobrelevação inicial do ramo é de -5,00% e que a sobrelevação correspondente à curva circular de raio 80 m deverá ser 5,00 %, optou-se por fazer o disfarce da sobrelevação desde o início do ramo até ao ponto do início da curva circular. Note-se que, o disfarce da sobrelevação para o caso dos nós não tem regras tão rigorosas como para o pleno traçado, sendo a principal preocupação respeitar a variação da sobrelevação mínima, por questões de drenagem.

$$\Delta Se(\%) = 20 \cdot \frac{(5 + 5)}{87,21} = 2,29\%/20 \text{ m} > 2\%/20 \text{ m}$$

Seguidamente, a sobrelevação terá de ter um decréscimo de 2,5% até ao ponto do ramo correspondente ao “nariz” da confluência. Nesta transição, como a inclinação transversal é maior que 2,5%, a drenagem fica garantida, não sendo necessário respeitar os 2%/20 m:

$$\Delta Se(\%) = 20 \cdot \frac{(2,5)}{35,09} = 1,42\%/20\text{m}$$

Se a variação da sobrelevação é inferior à mínima, obviamente será inferior à máxima (4,7%/20m).

Em Anexo (Desenho N°2.3) apresenta-se o perfil longitudinal referente ao ramo A.

#### 4.5.3.3. Ramo A+B

A definição da rasante do ramo A+B é sem dúvida a que requer maior atenção, estando várias condicionantes em jogo, nomeadamente as rasantes dos ramos C e D e o perfil da obra de arte.

Segunda as Normas de Traçado, deve-se respeitar um desnível de pelo menos 5 metros entre o ponto mais desfavorável da estrada principal e a parte inferior da laje do ramo A+B. Porém, sabendo que a inclinação inicial do ramo A+B deverá ser a mesma da do fim do ramo B (igual à do início do ramo A), além de se ter de respeitar o desnível de 5 metros, a rasante do ramo A+B não deverá ter uma cota muito elevada na zona presumível de confluência dos ramos C e D. Prevendo esta situação, tentou-se aumentar tanto quanto possível a extensão dos ramos C e D, para que estes não tivessem inclinações muito elevadas. Mesmo assim, chegou-se à conclusão que, ao respeitar sempre o desnível de 5 metros, a rasante do ramo A+B teria de apresentar uma parte descendente, de modo a conseguir respeitar os pontos de encontro com os respectivos ramos.

Posto isto, faltam ainda respeitar os raios mínimos das concordâncias verticais. Dadas as já referidas condicionantes, achou-se que o ideal seria optar pelo raio mínimo permitido, isto é, limitando a velocidade do ramo a 40 Km/h. No troço após a P.I. 1, optou-se por uma velocidade de 50 Km/h.

O raio mínimo para as concordâncias verticais é dado então por:

$$R_{\min} = \frac{40^2}{4} = 400\text{m}$$

##### a) Condicionantes da Rasante

Inicialmente, o ramo A+B terá de respeitar a cota do fim do ramo B acrescida da sobrelevação:

$$Z_i = Z_B + 6. Se_B$$

$$Z_i = 132,446 + 6.0,05 = 132,746$$

Como o eixo da estrada principal está a subir na direcção oeste e, sabendo que a obra de arte está numa zona em que o eixo é constituído por uma curva circular à direita (considerando o sentido quilométrico), o ponto mais desfavorável será o correspondente ao limite da berma da faixa externa da estrada principal (ponto *a* da Fig. 33). É importante referir ainda que a inclinação transversal da laje deverá ter o valor constante de 2,5%, por facilidade de construção.

Seja a seguinte figura:

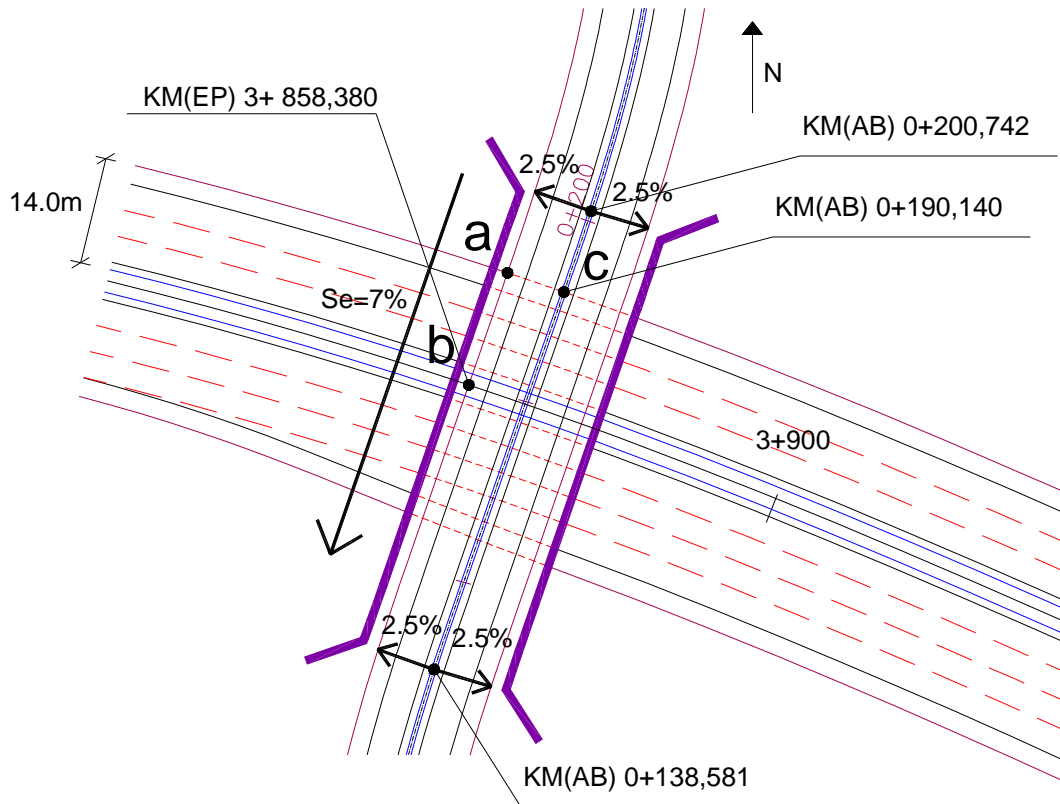


Fig. 33- Figura elucidativa para o cálculo da cota mínima a respeitar para o ramo A+B.

Sabendo que ao quilómetro 3+858,380 da estrada principal corresponde um cota de 131,516, determina-se a cota do ponto *a*:

$$Z_a = 131,516 + 14,007 = 132,496$$

Considerando para a espessura da laje 1,0 metros:

$$Z_c (\text{ramo A + B}) = 132,496 + (5,0 + 1,0) + 0,025 \cdot 7,5 = 138,684\text{m}$$

Assim, ao Km 0+190,140 do ramo A+B a cota deverá ser pelo menos 138,684m. Em princípio e o mais lógico, é que os outros pontos do ramo A+B na zona da obra de arte também respeitem a altura mínima livre de 5 metros. Mas, como o ramo A+B tem de passar por uma fase descendente para respeitar os pontos de encontro com os ramos C e D, leva a que na zona da obra de arte a rasante seja

em concordância. De qualquer modo, por uma questão de segurança, deve-se confirmar se no ponto inicial da obra de arte é respeitada a altura livre mínima.

Sintetizando, os elementos a respeitar para o ramo A+B são os seguintes:

Inclinação Inicial (%) : 5,520%

Quadro 9-Pontos a respeitar para o ramo A+B

Designação	KM	Se(%)	Z(m)
Início do Ramo	0+000,000	5,00	132,746
Ponto da O.A.	0+190,140	2,50	138,684

#### b) Definição da Rasante

Mais uma vez, a definição da rasante do ramo A+B foi conseguida analisando também e, em simultâneo, as rasantes dos ramos C e D. De forma a respeitar todos os condicionamentos impostos, chegou-se às seguintes características para a rasante:

- Para o segundo trainel em declive adoptou-se uma inclinação próxima da máxima admissível (7%);
- A C.V.Nº 1, ao apresentar um desenvolvimento de 70,0 metros, respeita a altura mínima livre sob a obra de arte e garante um raio superior ao mínimo admissível;
- A inclinação adoptada para o trainel do ramo A+B situado na zona de confluência dos Ramos C e D foi de 0,68%. Procurou-se com este valor assegurar a inclinação mínima necessária (0,5%) e ao mesmo tempo ser inferior a 3%, de modo a assegurar o rápido arranque dos veículos pesados;
- A C.V.Nº 2 foi escolhida tendo em conta as condicionantes dos ramos C e D e os trainéis já definidos, optando-se por um desenvolvimento de 40,0 metros para garantir o conforto óptico dos condutores;
- De forma a aproximar a rasante do terreno, optou-se por uma inclinação de 8% para o último trainel;
- Relativamente à C.V.Nº3, para que a confluência do ramo D com o ramo A+B se situe ainda em trainel e, considerando o perfil longitudinal do terreno, achou-se mais adequado um desenvolvimento de 90,0 metros para a respectiva concordância.

Em Anexo (A.2.4), apresentam-se os elementos característicos da rasante, assim como a listagem das cotas de 25 em 25 metros.

#### c) Sobreelevação

A sobreelevação inicial do ramo A+B foi escolhida de forma a respeitar a sobreelevação considerada para o fim do ramo B/início do ramo A, valor esse de 5%.

Para o caso da laje da obra de arte foi referido que a inclinação transversal se deveria manter constante com o valor de 2,5%. Para determinar o ponto onde começa a laje, é necessário ter em atenção o efeito das valetas e dos taludes na projecção dos pontos dos limites exteriores da estrada principal.

Para a plataforma da estrada principal foram consideradas valetas laterais de secção triangular, revestidas com betão com abertura menor ou igual a 1,20 m (ver pormenor em Anexo – Desenho 3.3), [6]. O talude não deverá começar imediatamente no extremo da valeta, mas sim a 1,0 m dela, sendo este pequeno trainel dotado de uma inclinação de 10%. Esta pequena largura adicional previne a acumulação de detritos nas valetas provenientes de pequenos deslizamentos do talude. Geralmente, a inclinação considerada para os taludes é de 1/1,5.

Projectando-se os pontos de acordo com o mencionado, verifica-se que o ponto inicial da obra de arte se situa sensivelmente a 17 m do limite da berma de intradorso da estrada principal (medida em projecção horizontal). Já o ponto final se situa a 10,5 m do limite da berma de extradorso:

Quadro 10-Pontos inicial e final da obra de arte

	KM (Ramo A+B)	Z
Ponto Inicial da O.A.	0+138,581	140,038
Ponto Final da O.A.	0+200,742	137,938

Na sua totalidade a laje tem um comprimento de aproximadamente 62 m.

Considerando então que, à saída da curva circular de raio 51,3 m, a sobrelevação decrescerá de 5% até ao ponto de início da obra de arte cuja inclinação é de -2,5% tem-se uma variação de:

$$\Delta Se(\%) = 20 \cdot \frac{7,5\%}{70,913} = 2,11\%/20 \text{ m} > 2\%/20 \text{ m}$$

A inclinação transversal de -2,5% mantém-se ao longo de toda obra de arte até que, após a sua passagem, a curva circular de raio 120 m obriga a uma nova sobrelevação. Para este raio a Norma de Nós de Ligação fixa como limites os valores de 3% e 5%. Como esta zona é particularmente “conflituosa”, devido à confluência dos ramos C e D, optou-se pela sobrelevação mais pequena permitida, 3%. A curva circular tomará o valor de 3% no primeiro ponto característico escolhido, referente aos ramos C e D, ponto correspondente ao “nariz” da divergência do ramo D, associado ao quilómetro 0+254,520 do ramo A+B. A variação da sobrelevação é dada por:

$$\Delta Se(\%) = 20 \cdot \frac{5,5\%}{(254,520 - 200,742)} = 2,05\%/20 \text{ m} > 2\%/20 \text{ m}$$

A sobrelevação de 3% manter-se-á até que se chegue ao fim da curva circular de raio 120 m. Deste modo, toda esta zona “conflituosa” ficará com uma sobrelevação constante de 3%.

Na parte seguinte do ramo A+B, fez-se o disfarce da sobrelevação normal para uma estrada comum, estando já o ponto de início da clotóide com um perfil sobrelevado com a inclinação da via de intradorso em alinhamento recto.

O disfarce da sobrelevação no alinhamento recto deverá ser limitado a uma distância máxima ( $L_{d_{máx}}$ ), de modo a garantir uma boa drenagem superficial:

Sabe-se pela equação (19) que:

$$L_d = \frac{i \cdot a}{0,1 \cdot \frac{a}{2}} = 10.2i$$

Com  $i=2,5\%$

$$L_d \leq 10.2.2,5 = 50,0m$$

Este valor e todos os outros anteriormente explicados poderão ser confirmados no perfil longitudinal do ramo A+B que se encontra em Anexo (Desenho N°2.4).





#### 4.5.3.4. Ramo C

Devido aos elevados raios adoptados para o ramo C, as velocidades específicas são também elevadas, chegando aos 75 Km/h para a curva circular de raio 200 m. Acontece que este ramo está condicionando no início pela estrada principal e no fim pelo ramo A+B. De forma a respeitar todos os pontos de cota conhecida, terão de se adoptar raios para as concordâncias e inclinação para os trainéis muito próximos dos limites regulamentados. Por questões de segurança e comodidade, a velocidade do ramo deverá ser limitada a 40 Km/h ( $R_{min}=400$  m)

##### a) Condicionantes da Rasante

Os pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo C foram:

- Ponto inicial do ramo;
- Ponto correspondente ao início do disfarce parabólico do eixo;
- Ponto correspondente ao “nariz”.

Inicialmente, o ramo C terá de respeitar a cota do eixo da estrada principal acrescida da sobrelevação:

$$Z_i = Z_{eixo} + 15.2,5\%$$

O disfarce parabólico da faixa exterior da estrada principal começa a uma distância  $L_d$  do início da clotóide (ver Fig.20), que é dado por (ver capítulo 4.5.1.2):

$$L_d = 0,336251 \cdot L'$$

Sendo  $L'=150,66$ m,

$$L_d = 0,336251 \cdot 150,66 = 50,660 \text{ m}$$

Este valor corresponde ao KM 4+019,830 da estrada principal. Relativamente ao ponto correspondente ao “nariz” da divergência, sabe-se que se situa ao KM 3+979,370 da estrada principal. Para calcular a sobrelevação neste ponto, recorre-se à equação (36) definida no capítulo 3.1.5.3:

$$S_x = \left(3 - \frac{2 \cdot x}{L'}\right) \cdot \left(\frac{x}{L'}\right)^2 \cdot (S_e + i) - i = -0,813\%$$

$X=40,460$ ;

$S_e=7\%$ ;

$i=2,5\%$ ;

$L=150,660$  m.

Os pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo C foram:

- Ponto final do ramo;
- Ponto do início da clotóide;
- Ponto correspondente ao “nariz”.

Estes pontos são determinados em função da rasante do ramo A+B. Em Anexo (A.2.5), encontram-se as cotas determinadas para todos os pontos escolhidos.

Quanto às inclinações longitudinais do ramo C, inicialmente deverá ter a inclinação longitudinal do eixo da estrada principal e na parte final a inclinação do trainel do ramo A+B com o qual converge. Sintetizando, os elementos a respeitar para o ramo C são os seguintes:

Inclinação Inicial (%) : 1,664%

Inclinação Final (%) : 0,680%

Quadro 11-Pontos a respeitar para a parte inicial do ramo C.

Designação	KM	Se(%)	Z(m)
Início do Ramo:	0+000,000	-2,50	127,64
Início do D.Parabólico:	0+048,900	-2,50	128,39
“Nariz”:	0+088,550	-0,81	129,33

Quadro 12-Pontos a respeitar para a parte final do ramo C.

Designação	KM	Se(%)	Z(m)
“Nariz”:	0+236,160	3,00	136,08
Início da clotóide:	0+255,028	3,00	136,07
Fim do Ramo:	0+293,220	3,00	136,26

## b) Definição da Rasante

Na zona da “cunha”, a largura considerada para a projecção dos pontos do eixo da estrada principal no ramo C não é constante, não sendo portanto esses pontos colineares longitudinalmente. Para isso definiu-se uma pequena concordância ( $D=20,0$  m) até ao ponto de início do disfarce parabólico, respeitando a inclinação inicial do ramo C.

Como se sabe, as concordâncias verticais são definidas por equações de segundo grau, surgindo uma incompatibilidade quando o disfarce da faixa de extradorso é uma equação do terceiro grau. Apesar disso, os raios considerados são “matematicamente” elevados, pelo que a parte do disfarce parabólico de 3º grau até ao ponto de inflexão pode ser aproximada a uma equação de 2º grau. Assim, optou-se por começar com uma concordância vertical no ponto de início do disfarce da sobrelevação. Para que a aproximação seja a melhor possível a concordância deverá ter um desenvolvimento menor do que o comprimento até à mudança de curvatura do disfarce parabólico.

O ponto de inflexão do disfarce parabólico é calculado pela equação (40):

$$\frac{d^2Sx}{dx^2} = (Se + i) \left[ \frac{6}{L'^2} - \frac{12x}{L'^3} \right] = 0$$

Com  $Se=7\%$ ,  $L'=150,66m$  e  $i=2,5\%$ :

$$x = 75,33 \text{ m}$$

Ou seja, para que a curvatura de ambas curvas (de 2º grau e 3º grau) sejam idênticas, a concordância vertical deverá ser côncava e com um desenvolvimento menor que 75,33 m.

Apesar deste cálculo, sabe-se que o último ponto comum à estrada principal e ao ramo (“nariz”) está para  $x=39,65 \text{ m}$ , isto é, para  $x \geq 39,65m$  o disfarce parabólico deixa de ter influência no ramo C.

Começando então uma concordância no ponto  $x=0$ , com a inclinação de entrada proveniente da concordância anterior e, sabendo o ponto final ( $x=39,65$ ), facilmente se determinam os parâmetros da rasante.

Como o ramo deverá ser em rampa, para poder respeitar as cotas finais, definiu-se uma concordância tangente à anterior de desenvolvimento 40,0 m. As Normas de Traçado referem que é opticamente desagradável a existência de duas concordâncias côncavas seguidas, mas devido às condicionantes deste ramo, achou-se que esta era a melhor solução. Ainda assim, definiu-se um desenvolvimento de 40,0 m para respeitar a comodidade óptica nesta última concordância.

Após o trainel em rampa, a concordância terá de ser obrigatoriamente convexa, tendo-lhe sido atribuído um desenvolvimento de 60,0 m, dados os valores das inclinações dos trainéis de entrada e de saída.

Quanto aos três pontos finais a respeitar, visto que a inclinação final teria de ser a do trainel do ramo A+B (0,68%), optou-se por uma concordância de pequeno desenvolvimento, procurando respeitar-se a inclinação mínima longitudinal.

Em Anexo (A.2.5), apresentam-se os elementos característicos da rasante, assim como a listagem das cotas de 25 em 25 metros.

### c) Sobreelevação

Toda a parte inicial do ramo C até ao ponto correspondente ao “nariz” deverá apresentar uma sobrelevação igual à da estrada principal. Após a divergência com a estrada principal, optou-se por fazer um disfarce até atingir uma sobrelevação 3%:

$$\Delta Se(\%) = 20 \cdot \frac{(3 - 0,81)}{20} = 2,19\%/20m > 2\%/20m$$

Durante a clotóide de saída da curva circular de raio 200,0m, fez-se uma variação da sobrelevação dos 3% no início da clotóide até aos 0% no ponto inicial do alinhamento recto (até aos 2,5% a variação

não é muito acentuada, mas dos 2,5% aos 0% a variação é a mínima admissível, 2%/20 m). De modo a respeitar a sobrelevação do ramo A+B no ponto correspondente ao “nariz”, procedeu-se a um disfarce até atingir a sobrelevação de 3%:

$$\Delta Se(\%) = 20 \cdot \frac{3}{16,62} = 3,61\%/20m < 4,7\%/20m$$

Como a parte final do ramo C converge numa zona de curva circular do ramo A+B, a sobrelevação de 3% manteve-se até ao final do ramo.

Em Anexo (Desenho Nº2.5) apresenta-se o perfil longitudinal referente ao ramo C.

#### 4.5.3.5. Ramo D

Da mesma forma que o ramo C, o ramo D está condicionado pelos ramo A+B e pela estrada principal. Ao apresentar uma curva circular de raio 50 m, achou-se que o mais adequado era limitar a velocidade do ramo a 40 Km/h.

##### a) Condicionantes da Rasante

Os pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo D foram:

- Ponto inicial do ramo;
- Ponto correspondente ao fim da clotóide;
- Ponto correspondente ao “nariz”.

Estes pontos terão de respeitar as cotas do ramo A+B acrescidas da sobrelevação:

$$Z_i = Z_{A+B} + \Delta x. (-3,0\%)$$

Os pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo D foram:

- Ponto correspondente ao “nariz”;
- Ponto correspondente ao fim da “cunha”;
- Ponto final do ramo.

Na parte final do ramo D surge um problema de continuidade da sobrelevação na convergência com a estrada principal. Na zona da “cunha” as curvaturas são contrárias. Por um lado, a sobrelevação da estrada principal é de 7% e por outro, a clotóide do ramo D deveria ter uma sobrelevação contrária para respeitar a sua curvatura. Acontece que, devido às condicionantes em planta, dificilmente se conseguirá garantir a mesma curvatura para ambos os elementos nesta zona. Sendo assim, no ponto correspondente ao “nariz”, o ramo terá uma sobrelevação contrária à sua curvatura. Esta situação não é particularmente grave dado que a clotóide tem um grande desenvolvimento, chegando à zona da “cunha” com um raio elevado. A Norma de Nós de Ligação refere ainda que a diferença algébrica máxima permitida entre a inclinação transversal da estrada principal e um ramo de ligação poderá atingir os 5% para uma velocidade de 40 Km/h. Assim, no ponto correspondente ao “nariz”, a sobrelevação adoptada foi de 2%, procedendo-se depois ao disfarce para atingir os 7% da estrada principal. As zonas de confluência com a estrada principal trazem sempre algumas dificuldades e, por vezes, não é possível respeitar todos os critérios que as normas impõem.

Em Anexo (A.2.6), encontram-se as cotas determinadas para todos os pontos escolhidos.

Quanto às inclinações longitudinais do ramo D, inicialmente deverá ter a inclinação longitudinal do ramo A+B e na parte final a inclinação do trainel do eixo da estrada principal. Sintetizando, os elementos a respeitar para o ramo D são os seguintes:

Inclinação Inicial (%) : -0,6800%

Inclinação Final (%) : 1,6638

Quadro 13- Pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo D.

Designação	KM	Se(%)	Z(m)
Ponto Inicial:	0+000,000	-3,00	135,73
Fim da Clotóide:	0+039,770	-3,00	135,34
“Nariz”:	0+053,120	-3,00	135,10

Quadro 14- Pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo D.

Designação	KM	Se(%) E.P./AB	Z(m)
“Nariz”:	129,710	7,00/2,00	132,73
Fim da Clotóide:	171,570	7,00/5,74	134,18
Fim do Ramo:	202,840	7,00/7,00	134,70

## b) Definição da Rasante

A definição da rasante do ramo D é talvez a que apresenta maior discrepância entre as condicionantes a respeitar. Quer-se dizer com isto que a parte inicial e final do ramo apresentam cotas fixas muito diferentes e difíceis de conjugar. Para isso, tentou-se adoptar concordâncias pequenas, respeitando sempre o raio mínimo. Após a passagem da divergência do ramo D com o ramo A+B, a rasante deverá apresentar um declive próximo do máximo admissível, para que seja possível definir uma concordância côncava no fim do trainel e se iniciar a subida com o fim de respeitar a inclinação de entrada na estrada principal.

Inicialmente, optou-se por uma pequena concordância de desenvolvimento 20,0 m entre dois trainéis com -0,68% e -1,80% de inclinação. Como a diferença de inclinação entre os trainéis é pequena, os desenvolvimentos das concordâncias não precisam de ser muito grandes, pois o raio resultante já é suficientemente elevado. Em relação à parte final do ramo, partindo do último ponto com a inclinação de 1,66%, atinge-se o ponto correspondente ao fim da clotóide. Note-se que, a escolha da sobrelevação de 5,74% já teve o propósito de dar uma cota que garantisse a inclinação de 1,66% entre os dois últimos pontos, o que evita a construção de uma outra concordância.

Na parte intermédia do ramo, a C.V.Nº 3 foi sujeita às inclinações dos trainéis já definidos e aos pontos de cota fixa, adoptando-se um desenvolvimento de 45,0 m.

Em Anexo (A.2.6), apresentam-se os elementos característicos da rasante, assim como a listagem das cotas de 25 em 25 metros.

## c) Sobrelevação

Toda a parte inicial do ramo D até ao ponto correspondente ao “nariz” deverá apresentar uma sobrelevação igual à do ramo A+B (3%). Após a divergência com o ramo, optou-se por fazer um disfarce até atingir uma sobrelevação de 4% (valor mínimo admissível para um raio de 50 m, segundo a Norma de Nós de Ligação).

Durante a clotóide de saída da curva circular de raio 50,0 m, fez-se uma variação da sobrelevação dos 4,0% no início da clotóide até aos -2,0% no ponto correspondente à convergência do ramo com a

estrada principal. A utilização desta sobrelevação parece à partida contraproducente, visto que em clotoíde a superfície do pavimento deverá estar ou abaixo da horizontal ou acima da horizontal, de modo a evitar uma inclinação transversal de 0% para prevenir o risco de aquaplanagem. Mas como foi já mencionado, os eixos convergentes têm curvaturas contrárias e sabendo que se terá de respeitar uma sobrelevação de 7% na estrada principal, achou-se mais adequado começar a fazer o disfarce da sobrelevação ainda em clotoíde. No disfarce efectuado entre os 4,0% e os -2,0% é preciso ter em atenção a variação mínima necessária da sobrelevação. Para isso, colocou-se o valor de 2,5% a 30 m do ponto correspondente aos -2,0% ( $\Delta Se = 3\%/20$  m). Seguidamente, o disfarce de sobrelevação é condicionado pela definição da rasante do ramo D. Mesmo assim, a variação da sobrelevação dos -2,0% até aos -5,74% dá um valor de 1,78%/20 m, que é inferior ao mínimo necessário. Mas como a zona crítica é só até aos -2,5% e como a inclinação do trainel neste ponto é aproximadamente 4%, é garantida uma boa drenagem das águas superficiais.

Em Anexo (Desenho Nº2.6) apresenta-se o perfil longitudinal referente ao ramo D.





# 5

## CONCLUSÃO

Com este estudo tentou-se, na medida do possível, sistematizar e, ao mesmo tempo, inovar uma metodologia concisa com os fundamentos teóricos necessários para a escolha do Traçado de um Nó de Ligação. Para isso, procurou-se desenvolver uma explicação teórica genérica que poderá servir como objecto de estudo e consulta na área de projectos semelhantes. Tendo sempre como base os conhecimentos académicos adquiridos nas disciplinas de Vias de Comunicação I, Vias de Comunicação II e Complementos de Estradas e Aeródromos, pretendeu-se também que fosse um complemento explicativo não só da “Norma de Nós de Ligação”, mas também das “Normas de Traçado” e “Norma de Intersecções” da responsabilidade da ex-JAE.



## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] *Norma de Nós de Ligação*. JAE P6/90.
- [2] *Normas de Traçado*. JAE, 1992.
- [3] Prof. Dr. Adalberto França. *Sebenta de Vias de Comunicação 1*. Faculdade de Engenharia, 1995.
- [4] *Norma de Intersecções*. JAE P5/90.
- [5] Prof. Dr. Adalberto França. *Sebenta de Vias de Comunicação 2*. Faculdade de Engenharia.
- [6] Prof. Dr. Adalberto França. *Tópicos e Resumos de Complementos de Estradas e Aeródromos*.
- [7] <http://www.estradasdeportugal.pt>



## **ANEXOS**

### **A.1 – DEFINIÇÃO NUMÉRICA DO TRAÇADO EM PLANTA**

- A.1.1 – ESTRADA PRINCIPAL;
- A.1.2 – RAMO B;
- A.1.3 – RAMO A;
- A.1.4 – RAMO A+B;
- A.1.5 – RAMO C;
- A.1.6 – RAMO D.

### **A.2 – DEFINIÇÃO NUMÉRICA DO TRAÇADO EM PERFIL LONGITUDINAL**

- A.2.1 – ESTRADA PRINCIPAL;
- A.2.2 – RAMO B;
- A.2.3 – RAMO A;
- A.2.4 – RAMO A+B;
- A.2.5 – RAMO C;
- A.2.6 – RAMO D.

### **A.3 – PEÇAS DESENHADAS**

- DESENHO Nº1 – PLANTA DE IMPLANTAÇÃO;
- DESENHO Nº2.1 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – ESTRADA PRINCIPAL;
- DESENHO Nº2.2 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – RAMO B;
- DESENHO Nº2.3 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – RAMO A;
- DESENHO Nº2.4 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – RAMO A+B;
- DESENHO Nº2.5 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – RAMO C;
- DESENHO Nº2.6 – PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL – RAMO D;
- DESENHO Nº3.1 – PORMENOR DO SEPARADOR DO TIPO FLEXÍVEL;
- DESENHO Nº3.2 – PORMENOR DO SEPARADOR DO TIPO RÍGIDO;
- DESENHO Nº3.3 – PORMENOR DA VALETA LATERAL DA ESTRADA PRINCIPAL.



## **A.1 - DEFINIÇÃO NUMÉRICA DO TRAÇADO EM PLANTA**





#### A.1.1 - ESTRADA PRINCIPAL

- Velocidade específica da estrada principal (km/h): 100 (R=600 m);
- Largura (m): 10,5;
- Bermas (m): Lado esquerdo: 1,0; Lado Direito: 2,5;
- Sobrelargura (m): Não tem (R > 200 m);
- Quilometragem da directriz calculada: 3+500,000 até 4+225,000.

#### ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA DIRECTRIZ

Quadro 15 – Estrada Principal: Elemento 1 – Curva Circular.

	Km	M	P	Azimute
Inicial	3+500,000	-33127,059	153293,137	82,4206
Final	3+869,161	-32763,873	153281,694	121,5898

Desenvolvimento (m) = 369,161

Raio (m) = 600,000

Centro da Curva: M= -32963,475

P= 152715,868

Vértice da Curva: M= -32983,783

P= 153359,269

Quadro 16 – Estrada Principal: Elemento 2 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	3+869,161	-32763,873	153281,694	121,5898	600,000
Final	3+969,161	-32671,590	153243,253	126,8950	∞

Desenvolvimento (m) = 100,000

Parâmetro (A) = 245,000

Quadro 17 – Estrada Principal: Elemento 3 – Alinhamento recto.

	Km	M	P
Inicial	3+969,161	-32671,590	153243,253
Final	4+225,000	-32438,792	153138,612

Desenvolvimento (m) = 255,839

Azimute (gr): 126,8950

## LISTAGEM DAS COORDENADAS DA DIRECTRIZ

Quadro 18 – Estrada Principal: Listagem das coordenadas da directriz.

KM	M	P	Azimute
3+500,000	-33127,059	153293,137	82,4206
3+525,000	-33102,871	153299,450	85,0732
3+550,000	-33078,441	153304,750	87,7258
3+575,000	-33053,812	153309,028	90,3784
3+600,000	-33029,025	153312,276	93,0309
3+625,000	-33004,125	153314,489	95,6835
3+650,000	-32979,155	153315,663	98,3361
3+675,000	-32954,157	153315,795	100,9887
3+700,000	-32929,175	153314,886	103,6413
3+725,000	-32904,253	153312,938	106,2939
3+750,000	-32879,434	153309,953	108,9464
3+775,000	-32854,760	153305,936	111,5990
3+800,000	-32830,276	153300,896	114,2516
3+825,000	-32806,022	153294,840	116,9042
3+850,000	-32782,042	153287,779	119,5565
3+875,000	-32758,377	153279,725	122,1673
3+900,000	-32735,039	153270,764	124,5448
3+925,000	-32711,969	153261,133	125,8163
3+950,000	-32689,075	153251,091	126,7712
3+975,000	-32666,264	153240,859	126,8950
4+000,000	-32643,462	153230,609	126,8950
4+025,000	-32620,660	153220,359	126,8950
4+050,000	-32597,858	153210,109	126,8950
4+075,000	-32575,056	153199,858	126,8950
4+100,000	-32552,254	153189,608	126,8950
4+125,000	-32529,452	153179,358	126,8950
4+150,000	-32506,650	153169,107	126,8950
4+175,000	-32483,848	153158,857	126,8950
4+200,000	-32461,046	153148,607	126,8950
4+225,000	-32438,792	153138,612	126,8950

#### A.1.2 - RAMO B

- Velocidades específicas do ramo (km/h): 40 (R=45 m);
- Largura do ramo (m): 4+sl;
- Bermas (m): lado esquerdo: 1,0; lado direito: 2,5;
- Sobrelargura (m): 1,0 (parte circular R=45 m);
- Quilometragem final da directriz calculada: 0+126,771.

#### ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA DIRECTRIZ

Quadro 19 – Ramo B: Elemento 1 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+000,000	-32728,714	153250,314	126,0354	1046,322
Final	0+027,561	-32704,727	153236,992	145,558	45,000

Desenvolvimento (m) = 27,561

Parâmetro (A) = 36,000

Quadro 20 – Ramo B: Elemento 2 – Curva Circular.

	Km	M	P	Azimute
Inicial	0+027,561	-32704,727	153236,992	145,5583
Final	0+126,771	-32724,335	153159,129	285,8411

Desenvolvimento (m) = 99,210

Raio (m) = 45,000

Centro da Curva: M= -32734,171

P= 153202,993

Vértice da Curva: M= -32637,718

P= 153178,718

#### LISTAGEM DAS COORDENADAS DA DIRECTRIZ

Quadro 21 – Ramo B: Listagem das coordenadas da directriz.

KM	M	P	Azimute
0+000,000	-32728,712	153250,328	126,0354
0+025,000	-32706,694	153238,662	142,2380
0+050,000	-32692,084	153218,759	177,2591
0+075,000	-32690,125	153194,157	212,6268
0+100,000	-32701,437	153172,222	247,9946
0+125,000	-32722,616	153159,552	283,3626
0+126,771	-32724,335	153159,129	285,8411

*LISTAGEM DAS COORDENADAS DO “TAPER” DA VIA DE ABRANDAMENTO*

Quadro 22 – Ramo B: Listagem das coordenadas do “taper”.

	M	P
Ponto Inicial (a=0):	-32831,7134	153287,8885
Centro da Curva R <sub>1</sub> :	-32887,8298	153044,2680
Centro da Curva R <sub>2</sub> :	-32423,0747	154177,3832
Ponto Final (a=3,5):	-32761,1138	153263,1539

Raio R<sub>1</sub>(m) = 250,000

Raio R<sub>2</sub> (m)= 974,723

### A.1.3 - RAMO A

- Velocidades específicas do ramo (km/h): 40 (R=57,6 m) ; 50 (R=80 m);
- Largura do ramo (m): 4+sl;
- Bermas (m): lado esquerdo: 1,0 ; lado direito: 2,5;
- Sobrelargura (m) : 1,0 (ponto inicial do ramo);
- Quilometragem final da directriz calculada: 0+163,216.

### ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA DIRECTRIZ

Quadro 23 – Ramo A: Elemento 1 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+000,000	-32721,537	153146,843	85,3942	-57,6
Final	0+035,156	-32689,653	153161,306	66,4128	$\infty$

Desenvolvimento (m) = 35,156

Parâmetro (A) = 45,000

Quadro 24 – Ramo A: Elemento 2 – Alinhamento recto.

	Km	M	P
Inicial	0+035,156	-32689,653	153161,306
Final	0+061,899	-32666,547	153174,772

Desenvolvimento (m) = 26,743

Azimute (gr): 66,4128

Quadro 25 – Ramo A: Elemento 3 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+061,899	-32666,547	153174,772	66,4128	$\infty$
Final	0+087,212	-32644,060	153186,330	76,4840	80

Desenvolvimento (m) = 25,313

Parâmetro (A) = 45,000

Quadro 26 – Ramo A: Elemento 4 – Curva Circular.

	Km	M	P	Azimute
Inicial	0+087,212	-32644,060	153186,330	76,4840
Final	0+137,903	-32594,281	153188,949	116,8234

Desenvolvimento (m) = 50,691

Raio (m) = 80,000

Centro da Curva: M= -32615,177

P=153111,726

Vértice da Curva: M= -32619,5995

P=153195,7996

Quadro 27 – Ramo A: Elemento 5 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+137,903	-32594,281	153188,949	116,8234	80,000
Final	0+163,216	-32570,705	153179,812	126,8950	$\infty$

Desenvolvimento (m) = 25,313

Parâmetro (A) = 45,000

#### LISTAGEM DAS COORDENADAS DA DIRECTRIZ

Quadro 28 – Ramo A: Listagem das coordenadas da directriz.

KM	M	P	Azimute
0+000,000	-32721,537	153146,843	85,3942
0+025,000	-32698,472	153156,267	67,9498
0+050,000	-32676,828	153168,778	66,4128
0+075,000	-32655,136	153181,204	69,0992
0+100,000	-32631,817	153189,976	86,6607
0+125,000	-32606,954	153191,302	106,5551
0+150,000	-32582,835	153185,056	124,0409
0+163,216	-32570,705	153179,812	126,8950

#### LISTAGEM DAS COORDENADAS DO “TAPER” DA VIA DE ACELERAÇÃO

Quadro 29 – Ramo A: Listagem das coordenadas do “taper”.

	M	P
Ponto Inicial (a=0):	-32432,855	153121,681
Centro da Curva R <sub>1</sub> :	-32297,691	153605,280
Centro da Curva R <sub>2</sub> :	-32558,0400	152843,2031
Ponto Final (a=3,5):	-32502,696	153149,239

Raio R<sub>1</sub>(m) = 500,000

Raio R<sub>2</sub> (m)= 305,321

#### A.1.4 - RAMO A+B

- Velocidades específicas do ramo (km/h): 40 (R=51,3 m) ; 60 (R=120 m); 50 (R=85 m);
- Largura do ramo (m): 4 + sl (2 vias) ou 7+sl (2x2 vias);
- Bermas (m): lado esquerdo: 1,0 ; lado direito: 2,5 do lado direito;  
Após a transição para 2 vias: lado esquerdo e direito: 1,5.
- Sobrelargura (m): 1,0 (no início do ramo); 1,0 (curva circular R=85 m);
- Quilometragem final da directriz calculada: 0+939,627.

#### ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA DIRECTRIZ

Quadro 30 – Ramo A+B: Elemento 1 – Curva Circular.

	Km	M	P	Azimute
Inicial	0+000,000	-32722,934	153153,017	285,8489
Final	0+067,668	-32779,967	153179,570	369,8564

Desenvolvimento (m) = 67,668

Raio (m) = 51,300

Centro da Curva: M= -32734,171

P= 153202,993

Vértice da Curva: M= -32761,740

P= 153144,226

Quadro 31 – Ramo A+B: Elemento 2 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+067,668	-32779,967	153179,570	369,8564	51,300
Final	0+150,657	-32774,732	153260,003	21,2050	∞

Desenvolvimento (m) = 82,989

Parâmetro (A) = 65,248

Quadro 32 – Ramo A+B: Elemento 3 – Alinhamento recto.

	Km	M	P
Inicial	0+150,657	-32774,732	153260,003
Final	0+186,729	-32762,927	153294,126

Desenvolvimento (m) = 36,072

Azimute (gr): 21,2050

Quadro 33 – Ramo A+B: Elemento 4 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+186,729	-32762,927	153294,126	21,2050	$\infty$
Final	0+233,604	-32750,535	153339,251	8,7702	-120,000

Desenvolvimento (m) = 46,875

Parâmetro (A) = 75,000

Quadro 34 – Ramo A+B: Elemento 5 – Curva Circular.

	Km	M	P	Azimute
Inicial	0+233,604	-32750,535	153339,251	8,7702
Final	0+321,602	-32770,056	153423,047	362,0866

Desenvolvimento (m) = 87,998

Raio (m) = -120,000

Centro da Curva: M= -32869,398

P= 153355,732

Vértice da Curva: M= -32744,206

P= 153384,897

Quadro 35 – Ramo A+B: Elemento 6 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+321,602	-32770,056	153423,047	362,0866	-120,000
Final	0+368,477	-32801,115	153458,050	349,6527	$\infty$

Desenvolvimento (m) = 46,875

Parâmetro (A) = 75,000

Quadro 36 – Ramo A+B: Elemento 7 – Alinhamento recto.

	Km	M	P
Inicial	0+368,477	-32801,115	153458,050
Final	0+543,655	-32925,657	153581,241

Desenvolvimento (m) = 175,178

Azimute (gr): 349,6527



Quadro 37 – Ramo A+B: Elemento 6 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+543,655	-32925,657	153581,241	349,6527	$\infty$
Final	0+593,361	-32957,308	153619,322	368,3374	65,000

Desenvolvimento (m) = 49,706

Parâmetro (A) = 65,000

Quadro 38 – Ramo A+B: Elemento 7 – Curva Circular.

	Km	M	P	Azimute
Inicial	0+593,361	-32957,308	153619,322	368,3374
Final	0+683,434	-32954,614	153705,201	35,7280

Desenvolvimento (m) = 90,073

Raio (m) = 85,000

Centro da Curva: M= -32882,648

P= 153659,961

Vértice da Curva: M= -32981,072

P= 153663,105

Quadro 39 – Ramo A+B: Elemento 8 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+683,434	-32954,614	153705,201	35,7280	85,000
Final	0+733,140	-32920,637	153741,222	54,3405	$\infty$

Desenvolvimento (m) = 49,706

Parâmetro (A) = 65,000

Quadro 40 – Ramo A+B: Elemento 9 – Alinhamento recto.

	Km	M	P
Inicial	0+733,140	-32920,637	153741,222
Final	0+939,627	-32765,012	153876,952

Desenvolvimento (m) = 206,487

Azimute (gr): 54,3405

## LISTAGEM DAS COORDENADAS DA DIRECTRIZ

Quadro 41 – Ramo A+B: Listagem das coordenadas da directriz.

KM	M	P	Azimute
0+000,000	-32722,934	153153,017	285,8489
0+025,000	-32747,681	153153,547	316,8754
0+050,000	-32769,300	153165,604	347,9019
0+075,000	-32782,840	153186,342	378,1771
0+100,000	-32786,349	153210,950	1,8435
0+125,000	-32782,473	153235,594	16,3646
0+150,000	-32774,933	153259,423	21,1863
0+175,000	-32766,759	153283,049	21,2050
0+200,000	-32758,651	153306,698	20,2691
0+225,000	-32752,002	153330,783	12,7906
0+250,000	-32749,398	153355,603	0,0682
0+275,000	-32751,966	153380,425	386,8053
0+300,000	-32759,612	153404,180	373,5423
0+325,000	-32772,007	153425,839	360,1631
0+350,000	-32788,118	153444,929	351,6754
0+375,000	-32805,759	153462,642	349,6527
0+400,000	-32823,533	153480,223	349,6527
0+425,000	-32841,306	153497,804	349,6527
0+450,000	-32859,080	153515,385	349,6527
0+475,000	-32876,854	153532,966	349,6527
0+500,000	-32894,627	153550,547	349,6527
0+525,000	-32912,401	153568,129	349,6527
0+550,000	-32930,168	153585,717	349,8925
0+575,000	-32947,062	153604,126	357,0204
0+600,000	-32960,252	153625,282	373,2461
0+625,000	-32966,973	153649,268	391,9702
0+650,000	-32966,452	153674,173	10,6943
0+675,000	-32958,733	153697,857	29,4184
0+700,000	-32944,615	153718,400	46,2016
0+725,000	-32926,745	153735,859	53,7557
0+750,000	-32907,922	153752,312	54,3405
0+775,000	-32889,081	153768,744	54,3405
0+800,000	-32870,240	153785,177	54,3405
0+825,000	-32851,399	153801,609	54,3405
0+850,000	-32832,558	153818,041	54,3405
0+875,000	-32813,717	153834,473	54,3405
0+900,000	-32794,876	153850,906	54,3405
0+925,000	-32776,035	153867,338	54,3405
0+939,627	-32765,012	153876,952	54,3405

*LISTAGEM DAS COORDENADAS RELACIONADAS COM A REDUÇÃO PARA 1 VIA POR SENTIDO*

Quadro 42 – Ramo A+B: Listagem das coordenadas relacionadas com a redução para uma via por sentido.

	Designação	M	P
LADO DIREITO (Sentido Quilométrico)	Ponto Inicial (a=7,0):	-32813,327	153481,804
	Centro da Curva $R_1$ :	-32953,926	153339,565
	Ponto Final (a=3,5):	-32857,187	153518,436
	Centro da Curva $R_2$ :	-32758,074	153618,639
LADO ESQUERDO (Sentido Quilométrico)	Ponto Inicial (a=7,0):	-32825,000	153470,001
	Centro da Curva $R'_1$ :	-32684,309	153612,149
	Ponto Final (a=3,5):	-32862,110	153513,459
	Centro da Curva $R'_2$ :	-32961,223	153413,255

Raios  $R_1=R'_1(m) = 200,000$

Raio  $R_2=R'_2(m) = 140,940$



#### A.1.5 - RAMO C

- Velocidades específicas do ramo (km/h): 75 (R=200 m) ; 60 (R=128,3 m);
- Largura do ramo (m): 4+sl;
- Bermas (m): lado esquerdo: 1,0 ; lado direito: 2,5;
- Sobrelargura (m) : não tem;
- Quilometragem final da directriz calculada: 0+293,220.

#### ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA DIRECTRIZ

Quadro 43 – Ramo C: Elemento 1 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+000,000	-32573,796	153217,383	326,8950	$\infty$
Final	0+098,000	-32659,377	153264,592	342,4929	200,000

Desenvolvimento (m) = 98,000

Parâmetro (A) = 140,000

Quadro 44 – Ramo C: Elemento 2 – Curva Circular.

	Km	M	P	Azimute
Inicial	0+098,000	-32659,377	153264,592	342,4929
Final	0+159,037	-32700,852	153309,051	361,9216

Desenvolvimento (m) = 61,037

Raio (m) = 200,000

Centro da Curva: M=-32535,576

P=153421,674

Vértice da Curva: M=-32683,533

P=153283,632

Quadro 45 – Ramo C: Elemento 3 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+159,037	-32700,852	153309,051	361,9216	200,000
Final	0+219,537	-32729,685	153362,168	371,5506	$\infty$

Desenvolvimento (m) = 60,500

Parâmetro (A) = 110,000

Quadro 46 – Ramo C: Elemento 4 – Alinhamento recto.

	Km	M	P
Inicial	0+219,537	-32729,685	153362,168
Final	0+255,028	-32745,025	153394,177

Desenvolvimento (m) = 35,491

Azimute (gr): 371,5506

Quadro 47 – Ramo C: Elemento 5 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+255,028	-32745,025	153394,177	371,5506	$\infty$
Final	0+293,220	-32763,200	153427,724	362,0747	-128,300

Desenvolvimento (m) = 38,192

Parâmetro (A) = 70,000

#### LISTAGEM DAS COORDENADAS DA DIRECTRIZ

Quadro 48 – Ramo C: Listagem das coordenadas da directriz.

KM	M	P	Azimute
0+000,000	-32573,796	153217,383	326,9013
0+025,000	-32596,542	153227,755	327,8476
0+050,000	-32618,944	153238,846	330,8714
0+075,000	-32640,590	153251,342	335,8744
0+100,000	-32660,942	153265,839	343,1299
0+125,000	-32679,392	153282,685	351,0876
0+150,000	-32695,598	153301,700	359,0454
0+175,000	-32709,353	153322,558	366,4359
0+200,000	-32721,149	153344,595	370,5344
0+225,000	-32732,046	153367,095	371,5506
0+250,000	-32742,850	153389,640	371,5506
0+275,000	-32753,897	153412,065	368,8843
0+293,220	-32763,1998	153427,7239	362,0747

#### LISTAGEM DAS COORDENADAS DO “TAPER” DE ABRANDAMENTO

Quadro 49 – Ramo C: Listagem das coordenadas do “taper”.

	M	P
Ponto Inicial (a=0):	-32506,824	153183,441
Centro da Curva R <sub>1</sub> :	-32383,824	153457,066
Centro da Curva R <sub>2</sub> :	-32780,978	152756,487
Ponto Final (a=3,5):	-32573,796	153217,383

Raio R<sub>1</sub>(m) = 300,000

Raio R<sub>2</sub> (m)= 505,321

#### A.1.6 - RAMO D

- Velocidades específicas do ramo (km/h): 55 (R =111,7 m) ; 40 (R=50 m);
- Largura do ramo (m): 4+sl;
- Bermas (m): lado esquerdo: 1,0 ; lado direito: 2,5;
- Sobrelargura (m) : 1,0 (parte circular R=50 m);
- Quilometragem final da directriz calculada: 0+202,843.

#### ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA DIRECTRIZ

Quadro 50 – Ramo D: Elemento 1 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+000,000	-32773,301	153412,671	166,2395	111,700
Final	0+039,771	-32762,317	153375,021	202,3245	50,000

Desenvolvimento (m) = 39,771

Parâmetro (A) = 60,000

Quadro 51 – Ramo D: Elemento 2 – Curva Circular.

	Km	M	P	Azimute
Inicial	0+039,771	-32762,317	153375,021	202,3245
Final	0+073,622	-32774,492	153344,107	244,9875

Desenvolvimento (m) = 33,851

Raio (m) = 50,000

Centro da Curva: M=-32812,337

P=153377,013

Vértice da Curva: M=-32762,909

P=153357,679

Quadro 52 – Ramo D: Elemento 3 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+073,622	-32774,492	153344,107	244,9875	50,000
Final	0+171,622	-32866,445	153325,136	307,6757	∞

Desenvolvimento (m) = 98,000

Parâmetro (A) = 70,000

Quadro 53 – Ramo D: Elemento 4 – Alinhamento recto.

	Km	M	P
Inicial	0+171,622	-32866,445	153325,136
Final	0+186,622	-32881,335	153326,943

Desenvolvimento (m) = 15,000

Azimute (gr): 307,6757

Quadro 54 – Ramo D: Elemento 5 – Clotóide.

	Km	M	P	Azimute	Raio
Inicial	0+186,622	-32881,335	153326,943	307,6757	$\infty$
Final	0+202,843	-32897,446	153328,821	306,9703	616,5

Desenvolvimento (m) = 16,221

Parâmetro (A) = 100,000

#### LISTAGEM DAS COORDENADAS DA DIRECTRIZ

Quadro 55 – Ramo D: Listagem das coordenadas da directriz.

KM	M	P	Azimute
0+000,000	-32773,301	153412,672	166,2395
0+025,000	-32763,750	153389,678	185,3964
0+050,000	-32763,768	153364,911	215,4885
0+075,000	-32775,427	153343,089	247,2779
0+100,000	-32795,799	153328,937	274,8043
0+125,000	-32819,979	153322,977	294,0208
0+150,000	-32844,947	153322,883	304,9274
0+175,000	-32869,802	153325,546	307,6757
0+200,000	-32894,625	153328,513	307,1090
0+202,843	-32897,446	153328,821	306,9703

#### LISTAGEM DAS COORDENADAS DO “TAPER” DA VIA DE ACELERAÇÃO

Quadro 56 – Ramo D: Listagem das coordenadas do “taper”.

	M	P
Ponto Inicial (a=3,5):	-32974,4413	153332,2700
Centro da Curva R <sub>1</sub> :	-32969,2826	153042,3158
Centro da Curva R <sub>2</sub> :	-33108,8250	153751,4585
Ponto Final (a=0):	-33048,6771	153322,9174

Raio R<sub>1</sub>(m) = 290,000

Raio R<sub>2</sub> (m)= 432,742



## **A.2 - DEFINIÇÃO NUMÉRICA DO TRAÇADO EM PERFIL LONGITUDINAL**



#### A.2.1 - ESTRADA PRINCIPAL

- Quilometragem final da rasante calculada: 3+500,000 até 4+225,000;
- Velocidade da estrada principal (km/h): 100.

#### ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA RASANTE

Quadro 57 – Estrada Principal: Elemento 1 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	3+500,000	138,628	-3,9624
Final	3+600,000	135,815	-1,6638

Desenvolvimento (m) = 100,000 (metade da concordância)

Raio Vertical (m): -4350,687

Bissectriz (m): 1,149

Ponto de Cota min/max: Km=3+600,000

Cota= 135,815

Quadro 58 – Estrada Principal: Elemento 2 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	3+600,000	135,815
Final	4+225,000	125,416

Desenvolvimento (m) = 625,000

Inclinação (%) = -1,6638

#### LISTAGEM DAS COTAS DA RASANTE

Quadro 59 – Estrada Principal: Listagem das cotas da rasante.

KM	Cota	Inclinação (%)
3+500,000	138,628	-3,9624
3+525,000	137,709	-3,3878
3+550,000	136,934	-2,8132
3+575,000	136,302	-2,2385
3+600,000	135,815	-1,6639
3+625,000	135,399	-1,6639
3+650,000	134,983	-1,6639
3+675,000	134,567	-1,6639
3+700,000	134,151	-1,6639
3+725,000	133,735	-1,6639
3+750,000	133,319	-1,6639

3+775,000	132,903	-1,6639
3+800,000	132,487	-1,6639
3+825,000	132,071	-1,6639
3+850,000	131,655	-1,6639
3+875,000	131,239	-1,6639
3+900,000	130,823	-1,6639
3+925,000	130,407	-1,6639
3+950,000	129,991	-1,6639
3+975,000	129,575	-1,6639
4+000,000	129,159	-1,6639
4+025,000	128,743	-1,6639
4+050,000	128,327	-1,6639
4+075,000	127,911	-1,6639
4+100,000	127,496	-1,6639
4+125,000	127,080	-1,6639
4+150,000	126,664	-1,6639
4+175,000	126,248	-1,6639
4+200,000	125,832	-1,6639
4+225,000	125,416	-1,6639

## VÉRTICES

Quadro 60 – Estrada Principal: Vértices.

Designação	KM	Cota
Ponto Inicial	3+500,000	138,628
C.V.1	3+500,000	138,628

## A.2.2 - RAMO B

Relativamente à parte inicial do ramo B, os pontos correspondentes do eixo da estrada principal são:

Quadro 61 – Pontos correspondentes do eixo da estrada principal para a parte inicial do ramo B.

Designação	KM	Z(m)	Clotóide (m)	Se(%)
Início do ramo B:	3+913,730	130,60	55,43	5,00%
Início da Curva Circular:	3+942,950	130,11	26,22	3,68%
“Nariz”:	3+952,970	129,94	16,19	3,23%

Então, os pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo B têm as seguintes cotas:

Quadro 62- Pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo B.

Designação	KM	Largura(M)	Se(%)	Z(m)
Início do ramo B:	0+000,000	15,00	5,00%	129,85
Início da Curva Circular:	0+28,800	17,99	3,68%	129,45
“Nariz”:	0+36,100	21,90	3,23%	129,23

- Quilometragem final da rasante calculada: 0+126,771;
- Velocidade do ramo (km/h) : 40;
- Raio mínimo admissível para as concordâncias (m): 400.

## ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA RASANTE

Quadro 63 – Ramo B: Elemento 1 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+000,000	129,850
Final	0+014,780	129,702

Desenvolvimento (m) = 14,780

Inclinação (%) = -1,000

Quadro 64 – Ramo B: Elemento 2 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+014,780	129,702	-1,000
Final	0+036,100	129,230	-3,430

Desenvolvimento (m) = 21,320

Raio Vertical (m): 877,482

Bissectriz (m): -0,065

Ponto de Cota min/max: Km=0+014,780

Cota= 129,702

Quadro 65 – Ramo B: Elemento 3 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+036,100	129,230	-3,430
Final	0+076,100	129,649	5,520

Desenvolvimento (m) = 40,000

Raio Vertical (m): -446,775

Bissectriz (m): 0,447

Ponto de Cota min/max: Km=0+51,420

Cota= 128,967

Quadro 66 – Ramo B: Elemento 4 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+076,100	129,649
Final	0+126,771	132,446

Desenvolvimento (m) = 50,671

Inclinação (%) = 5,520

### LISTAGEM DAS COTAS DA RASANTE

Quadro 67 – Ramo B: Listagem das cotas da rasante.

KM	Cota	Inclinação (%)
0+000,000	129,850	-1,0000
0+025,000	129,541	-2,1647
0+050,000	128,970	-0,3188
0+075,000	129,589	5,2768
0+100,000	130,968	5,5200
0+125,000	132,348	5,5200
0+126,771	132,446	5,5200

## *VÉRTICES*

Quadro 68 – Ramo B: Vértices.

Designação	KM	Cota
Ponto Inicial	0+000,000	129,850
C.V.1	0+025,442	129,596
C.V.2	0+056,091	128,544
Ponto Final	0+126,771	132,446





### A.2.3 - RAMO A

Relativamente à parte final do ramo A, os pontos correspondentes do eixo da estrada principal são:

Quadro 69 – Pontos correspondentes do eixo da estrada principal para a parte final do ramo A.

Designação	KM	Z(m)	Se(%)
"Nariz":	4+044,540	128,42	2,50
Início da Clotóide:	4+061,330	128,14	2,50
Fim do Ramo:	4+087,19	127,71	2,50

Então, os pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo A têm as seguintes cotas:

Quadro 70- Pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo A.

Designação	KM	Largura(M)	Se(%)	Z(m)
"Nariz":	0+122,290	20,69	2,50	127,90
Início da Clotóide:	0+137,903	16,38	2,50	127,73
Fim do Ramo:	0+163,216	15,00	2,50	127,33

- Quilometragem final da rasante calculada: 0+163,216;
- Velocidade do ramo (km/h) : 40;
- Raio mínimo admissível para as concordâncias (m): 400.

### ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA RASANTE

Quadro 71 – Ramo A: Elemento 1 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+000,000	133,050
Final	0+053,578	130,093

Desenvolvimento (m) = 53,578

Inclinação (%) = -5,5200

Quadro 72 – Ramo A: Elemento 2 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+053,578	130,093	-5,5200
Final	0+122,290	127,900	-0,8600

Desenvolvimento (m) = 68,712

Raio Vertical (m): -1475,055

Bissectriz (m): 0,400

Ponto de Cota min/max: Km=0+122,290

Cota= 127,900

Quadro 73 – Ramo A: Elemento 3 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+122,290	127,900	-0,8600
Final	0+149,714	127,554	-1,6638

Desenvolvimento (m) = 27,424

Raio Vertical (m): 3419,956

Bissectriz (m): 0,027

Ponto de Cota min/max: Km=0+122,290

Cota= 127,900

Quadro 74 – Ramo A: Elemento 4 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+149,714	127,554
Final	0+163,216	127,330

Desenvolvimento (m) = 13,502

Inclinação (%) = -1,6638

## LISTAGEM DAS COTAS DA RASANTE

Quadro 75 – Ramo A: Listagem das cotas da rasante.

KM	Cota	Inclinação (%)
0+000,000	133,050	-5,5200
0+025,000	131,670	-5,5200
0+050,000	130,290	-5,5200
0+075,000	129,072	-4,0677
0+100,000	128,267	-2,3728
0+125,000	127,871	-0,9392
0+150,000	127,550	-1,6640
0+163,216	127,330	-1,6640

## VÉRTICES

Quadro 76 – Ramo A: Vértices.

Designação	KM	Cota
Ponto Inicial	0+000,000	133,050
C.V.1	0+087,947	128,195
C.V.2	0+135,970	127,782
Ponto Final	0+163,216	127,330

#### A.2.4 - RAMO A+B

- Quilometragem final da rasante calculada: 0+939,627;
- Velocidade do ramo (km/h) : 40 até a P.I.1 e 50 até ao fim;
- Raio mínimo admissível para as concordâncias (m): 400.

#### ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA RASANTE

Quadro 77 – Ramo A+B: Elemento 1 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+000,000	132,746
Final	0+118,718	139,298

Desenvolvimento (m) = 118,718

Inclinação (%) = 5,5200

Quadro 78 – Ramo A+B: Elemento 2 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+118,718	139,298	5,5200
Final	0+188,718	138,780	-7,0000

Desenvolvimento (m) = 70,000

Raio Vertical (m): 559,029

Bissectriz (m): -1,096

Ponto de Cota min/max: Km=0+149,580

Cota= 140,150m

Quadro 79 – Ramo A+B: Elemento 3 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+188,718	138,780
Final	0+216,43	136,840

Desenvolvimento (m) = 27,710

Inclinação (%) = -7,0000

Quadro 80 – Ramo A+B: Elemento 4 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+216,43	136,840	-7,0000
Final	0+256,427	135,575	0,6800

Desenvolvimento (m) = 40,000

Raio Vertical (m): -520,717

Bissectriz (m): 0,384

Ponto de Cota min/max: Km=0+252,890

Cota= 135,563

Quadro 81 – Ramo A+B: Elemento 5 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+256,427	135,575
Final	0+322,138	136,022

Desenvolvimento (m) = 65,711

Inclinação (%) = 0,6800

Quadro 82 – Ramo A+B: Elemento 6 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+322,138	136,022	0,6800
Final	0+412,138	139,928	8,0000

Desenvolvimento (m) = 90,000

Raio Vertical (m): -1229,508

Bissectriz (m): 0,824

Ponto de Cota min/max: Km=0+322,138

Cota= 136,022

Quadro 83 – Ramo A+B: Elemento 7 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+412,138	139,928
Final	0+939,627	182,254

Desenvolvimento (m) = 527,489

Inclinação (%) = 8,0000

## LISTAGEM DAS COTAS DA RASANTE

Quadro 84 – Ramo A+B: Listagem das cotas da rasante.

KM	Cota	Inclinação (%)
0+000,000	132,746	5,5200
0+025,000	134,125	5,5200
0+050,000	135,505	5,5200
0+075,000	136,885	5,5200
0+100,000	138,265	5,5200
0+125,000	139,606	4,3962
0+150,000	140,148	-0,0759
0+175,000	139,570	-4,5479
0+200,000	137,990	-7,0000
0+225,000	136,315	-5,3536
0+250,000	135,576	-0,5525
0+275,000	135,701	0,6800
0+300,000	135,871	0,6800
0+325,000	136,048	0,9127
0+350,000	136,528	2,9461
0+375,000	137,521	4,9794
0+400,000	139,019	7,0127
0+425,000	140,957	8,0000
0+450,000	142,957	8,0000
0+475,000	144,957	8,0000
0+500,000	146,957	8,0000
0+525,000	148,957	8,0000
0+550,000	150,957	8,0000
0+575,000	152,957	8,0000
0+600,000	154,957	8,0000
0+625,000	156,957	8,0000
0+650,000	158,957	8,0000
0+675,000	160,957	8,0000
0+700,000	162,957	8,0000
0+725,000	164,957	8,0000
0+750,000	166,957	8,0000
0+775,000	168,957	8,0000
0+800,000	170,957	8,0000
0+825,000	172,957	8,0000
0+850,000	174,957	8,0000
0+875,000	176,957	8,0000
0+900,000	178,957	8,0000
0+925,000	180,957	8,0000
0+939,627	182,254	8,0000

## VÉRTICES

Quadro 85 – Ramo A+B: Vértices.

Designação	KM	Cota
Ponto Inicial	0+000,000	132,746
C.V.1	0+153,718	141,230
C.V.2	0+236,427	135,439
C.V.3	0+367,138	136,328
Ponto Final	0+939,627	182,254

## A.2.5 - RAMO C

Relativamente à parte inicial do ramo C, os pontos correspondentes do eixo da estrada principal são:

Quadro 86 – Pontos correspondentes do eixo da estrada principal para a parte inicial do ramo C.

Designação	KM	Z(m)	Se(%)
Início do Ramo:	4+068,970	128,01	-2,50
Início do D.Parabólico:	4+019,830	128,83	-2,50
"Nariz":	3+979,370	129,50	-0,81

Então, os pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo C têm as seguintes cotas:

Quadro 87- Pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo C.

Designação	KM	Largura(M)	Se(%)	Z(m)
Início do Ramo:	0+000,000	15,00	-2,50	127,64
Início do D.Parabólico:	0+048,900	17,51	-2,50	128,39
"Nariz":	0+088,550	21,033	-0,81	129,33

Relativamente à parte final do ramo C, os pontos correspondentes do ramo A+B são:

Quadro 88 – Pontos correspondentes do ramo A+B para a parte final do ramo A+B.

Designação	KM	Z(m)	Se(%)
"Nariz":	0+267,830	135,65	3,00
Início da clotóide:	0+285,480	135,77	3,00
Fim do Ramo:	0+321,570	136,02	3,00

Então, os pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo C têm as seguintes cotas:

Quadro 89- Pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo C.

Designação	KM	Largura(M)	Se(%)	Z(m)
"Nariz":	0+236,160	14,198	3,00	136,08
Início da clotóide:	0+255,028	9,93	3,00	136,07
Fim do Ramo:	0+293,220	8,00	3,00	136,26

- Quilometragem final da rasante calculada: 0+293,220;
- Velocidade do ramo (km/h) : 40;
- Raio mínimo admissível para as concordâncias (m): 400.

## ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA RASANTE

Quadro 90 – Ramo C: Elemento 1 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+000,000	127,640
Final	0+028,900	128,120

Desenvolvimento (m) = 28,900

Inclinação (%) = 1,6638

Quadro 91 – Ramo C: Elemento 2 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+028,900	128,120	1,6638
Final	0+048,900	128,390	1,0400

Desenvolvimento (m) = 20,000

Raio Vertical (m): 3239,391

Bissectriz (m): -0,016

Ponto de Cota min/max: Km=0+048,900

Cota= 128,390

Quadro 92 – Ramo C: Elemento 3 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+048,900	128,390	1,0400
Final	0+088,550	129,330	3,7000

Desenvolvimento (m) = 39,650

Raio Vertical (m): -1489,768

Bissectriz (m): 0,132

Ponto de Cota min/max: Km=0+048,900

Cota= 128,390

Quadro 93 – Ramo C: Elemento 4 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+088,550	129,330	3,7000
Final	0+128,550	131,670	8,0000

Desenvolvimento (m) = 40,000

Raio Vertical (m): -930,233

Bissectriz (m): 0,215

Ponto de Cota min/max: Km=0+088,550

Cota= 129,330



Quadro 94 – Ramo C: Elemento 5 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+128,550	131,670
Final	0+154,020	133,708

Desenvolvimento (m) = 25,470

Inclinação (%) = 8,0000

Quadro 95 – Ramo C: Elemento 6 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+154,020	133,708	8,0000
Final	0+214,020	136,092	-0,0500

Desenvolvimento (m) = 60,000

Raio Vertical (m): 745,064

Bissectriz (m): -0,604

Ponto de Cota min/max: Km=0+213,630

Cota= 136,093

Quadro 96 – Ramo C: Elemento 7 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+214,020	136,092
Final	0+255,038	136,070

Desenvolvimento (m) = 41,018

Inclinação (%) = -0,0500

Quadro 97 – Ramo C: Elemento 8 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+255,038	136,070	-0,0500
Final	0+274,038	136,130	0,6800

Desenvolvimento (m) = 19,000

Raio Vertical (m): -2592,108

Bissectriz (m): 0,017

Ponto de Cota min/max: Km=0+256,410

Cota= 136,069

Quadro 98 – Ramo C: Elemento 9 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+274,038	136,130
Final	0+293,220	136,260

Desenvolvimento (m) = 19,182

Inclinação (%) = 0,6800

### LISTAGEM DAS COTAS DA RASANTE

Quadro 99 – Ramo C: Listagem das cotas da rasante.

KM	Cota	Inclinação (%)
0+000,000	127,640	1,6638
0+025,000	128,055	1,6638
0+050,000	128,403	1,1138
0+075,000	128,892	2,7920
0+100,000	129,827	4,9309
0+125,000	131,396	7,6184
0+150,000	133,386	8,0000
0+175,000	135,088	5,1842
0+200,000	135,965	1,8288
0+225,000	136,086	-0,0500
0+250,000	136,073	-0,0500
0+275,000	136,136	0,6800
0+293,220	136,260	0,6800

### VÉRTICES

Quadro 100 – Ramo C: Vértices.

Designação	KM	Cota
Ponto Inicial	0+000,000	127,640
C.V.1	0+038,942	128,286
C.V.2	0+068,714	128,596
C.V.3	0+108,550	130,070
C.V.4	0+184,020	136,108
C.V.5	0+264,511	136,065
Ponto Final	0+293,220	136,260

## A.2.6 - RAMO D

Relativamente à parte inicial do ramo D, os pontos correspondentes do ramo A+B são:

Quadro 101 – Pontos correspondentes do ramo A+B para a parte inicial do ramo D.

Designação	KM	Z(m)	Se(%)
Ponto Inicial:	0+314,320	135,97	-3,00
Fim da Clotóide:	0+270,240	135,67	-3,00
"Nariz":	0+254,520	135,57	-3,00

Então, os pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo D têm as seguintes cotas:

Quadro 102- Pontos característicos escolhidos para a parte inicial do ramo D.

Designação	KM	Largura(m)	Se(%)	Z(m)
Ponto Inicial:	0+000,000	8,00	-3,00	135,73
Fim da Clotóide:	0+039,770	11,02	-3,00	135,34
"Nariz":	0+053,120	15,46	-3,00	135,10

Relativamente à parte final do ramo D, os pontos correspondentes da estrada principal são:

Quadro 103 – Pontos correspondentes da estrada principal para a parte final do ramo D.

Designação	KM	Z(m)	Se(%)
"Nariz":	3+802,560	132,44	7,00
Fim da Clotóide	3+760,440	133,15	7,00
Fim do Ramo:	3+730,070	133,65	7,00

Então, os pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo D têm as seguintes cotas:

Quadro 104- Pontos característicos escolhidos para a parte final do ramo D.

Designação	KM	Largura(m) E.P.+AB	Se(%) E.P./AB	Z(m)
"Nariz":	129,710	14,00+7,21	7,00/2,00	132,73
Fim da Clotóide:	171,570	11,5+3,95	7,00/5,74	134,18
Fim do Ramo:	202,840	11,5+3,50	7,00/7,00	134,70

- Quilometragem final da rasante calculada: 0+202,843;
- Velocidade do ramo (km/h) : 40;
- Raio mínimo admissível para as concordâncias (m): 400.

## ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DA RASANTE

Quadro 105 – Ramo D: Elemento 1 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+000,000	135,730
Final	0+019,073	135,600

Desenvolvimento (m) = 19,073

Inclinação (%) = -0,6800

Quadro 106 – Ramo D:Elemento 2 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+019,073	135,600	-0,6800
Final	0+039,073	135,353	-1,8000

Desenvolvimento (m) = 20,000

Raio Vertical (m): 1789,304

Bissectriz (m): -0,028

Ponto de Cota min/max: Km=0+019,073

Cota= 135,600

Quadro 107 – Ramo D:Elemento 3 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+039,073	135,353
Final	0+053,277	135,097

Desenvolvimento (m) = 14,204

Inclinação (%) = -1,8000

Quadro 108 – Ramo D:Elemento 4 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+053,277	135,097	-1,8000
Final	0+074,777	134,138	-7,1300

Desenvolvimento (m) = 21,500

Raio Vertical (m): 403,257

Bissectriz (m): -0,143

Ponto de Cota min/max: Km=0+053,277

Cota= 135,097

Quadro 109 – Ramo D:Elemento 5 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+074,777	134,138
Final	0+084,579	133,439

Desenvolvimento (m) = 9,802

Inclinação (%) = -7,1300

Quadro 110 – Ramo D:Elemento 6 – Concordância Vertical.

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+084,579	133,439	-7,1300
Final	0+129,579	132,725	3,9600

Desenvolvimento (m) = 45,000

Raio Vertical (m): -405,922

Bissectriz (m): -0,624

Ponto de Cota min/max: Km=0+113,520

Cota= 132,407

Quadro 111 – Ramo D:Elemento 7 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+129,579	132,725
Final	0+154,065	133,694

Desenvolvimento (m) = 24,486

Inclinação (%) = 3,9600

Quadro 112 – Ramo D:Elemento 8 – Concordância Vertical

	Km	Cota	Inclinação(%)
Inicial	0+154,065	133,694	3,9600
Final	0+171,065	134,171	1,6638

Desenvolvimento (m) = 17,000

Raio Vertical (m): 741,477

Bissectriz (m): -0,487

Ponto de Cota min/max: Km=0+171,065

Cota= 134,171

Quadro 113 – Ramo D:Elemento 9 – Trainel.

	Km	Cota
Inicial	0+171,065	134,171
Final	0+202,840	134,700

Desenvolvimento (m) = 31,775

Inclinação (%) = 1,6638

## LISTAGEM DAS COTAS DA RASANTE

Quadro 114 – Ramo D: Listagem das cotas da rasante.

KM	Cota	Inclinação (%)
0+000,000	135,730	-0,6800
0+025,000	135,543	-1,0112
0+050,000	135,156	-1,8000
0+075,000	134,122	-7,1300
0+100,000	132,635	-3,3309
0+125,000	132,572	2,8279
0+150,000	133,533	3,9600
0+175,000	134,237	1,6638
0+200,000	134,653	1,6638
0+202,840	134,700	1,6638

## VÉRTICES

Quadro 115 – Ramo D: Vértices.

Designação	KM	Cota
Ponto Inicial	0+000,000	135,730
C.V.1	0+029,073	135,532
C.V.2	0+064,027	134,904
C.V.3	0+107,079	131,835
C.V.4	0+162,565	134,030
Ponto Final	0+202,840	134,700

# **PROJECTO DE EXECUÇÃO DE UM NÓ DE LIGAÇÃO EM TROMPETE NAS ESPECIALIDADES DE GEOMETRIA DO TRAÇADO E PAVIMENTAÇÃO**

**A.3 – Peças Desenhadas**

**JOÃO PEDRO CAMELO FRAGATA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO**

---

Orientador: Professor Doutor Adalberto Quelhas da Silva França

MARÇO DE 2008

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

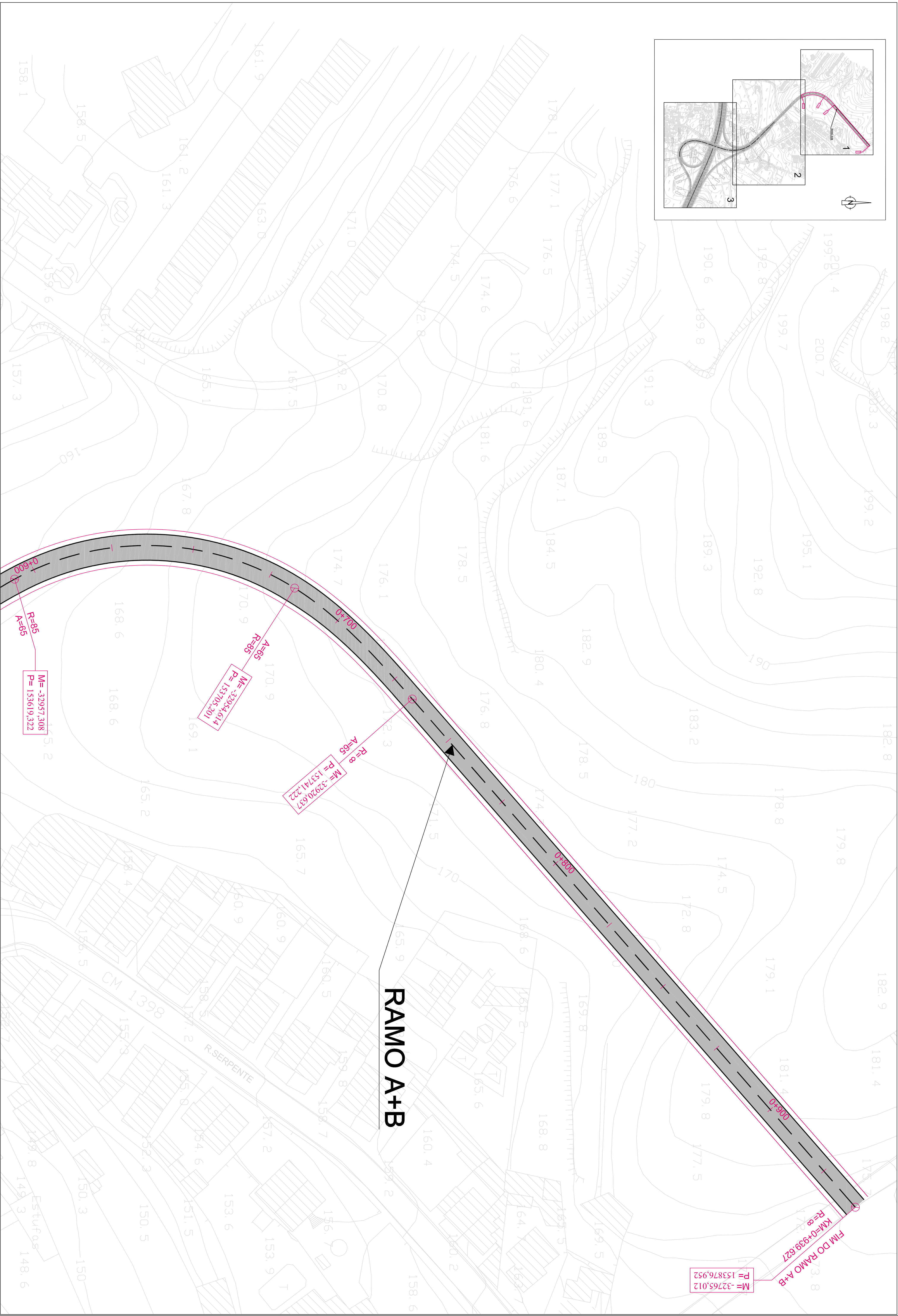
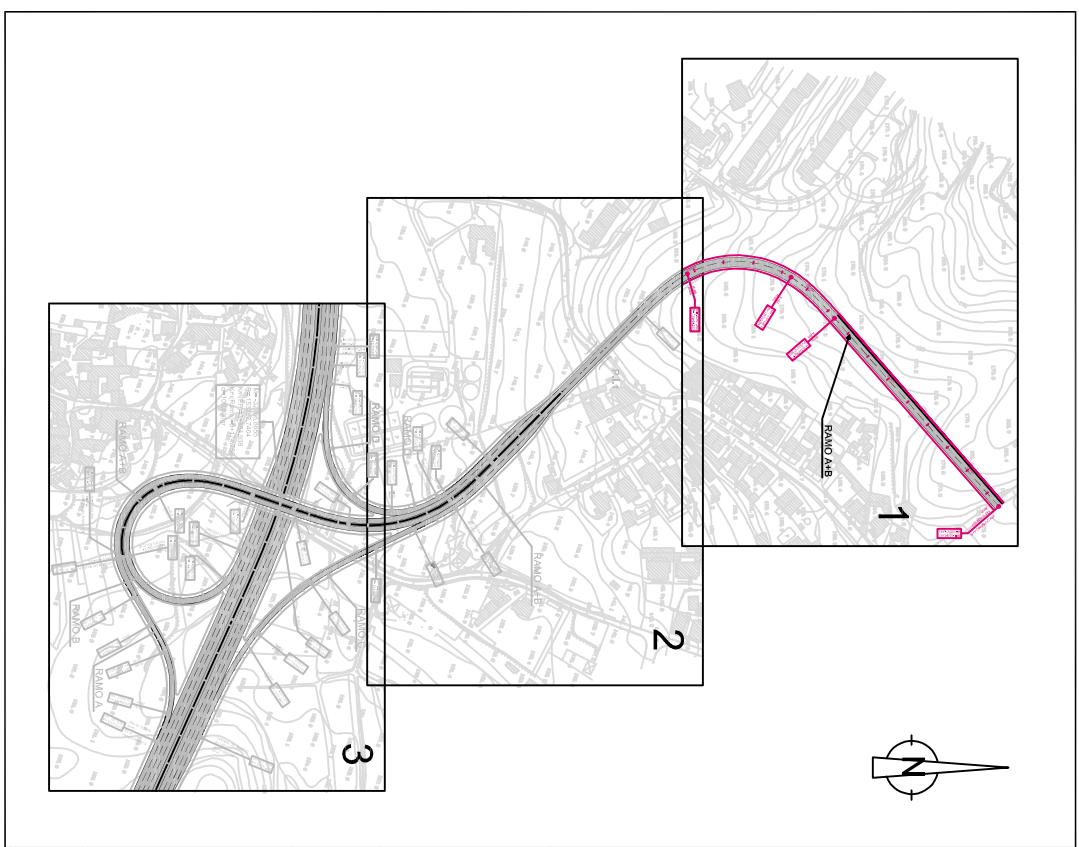
🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.





M=-32765,012  
P=153876,952

FIM DO RAMO A+B  
KM=0+939,627  
R=8

M=-32920,637  
P=153741,222  
R=8  
A=65

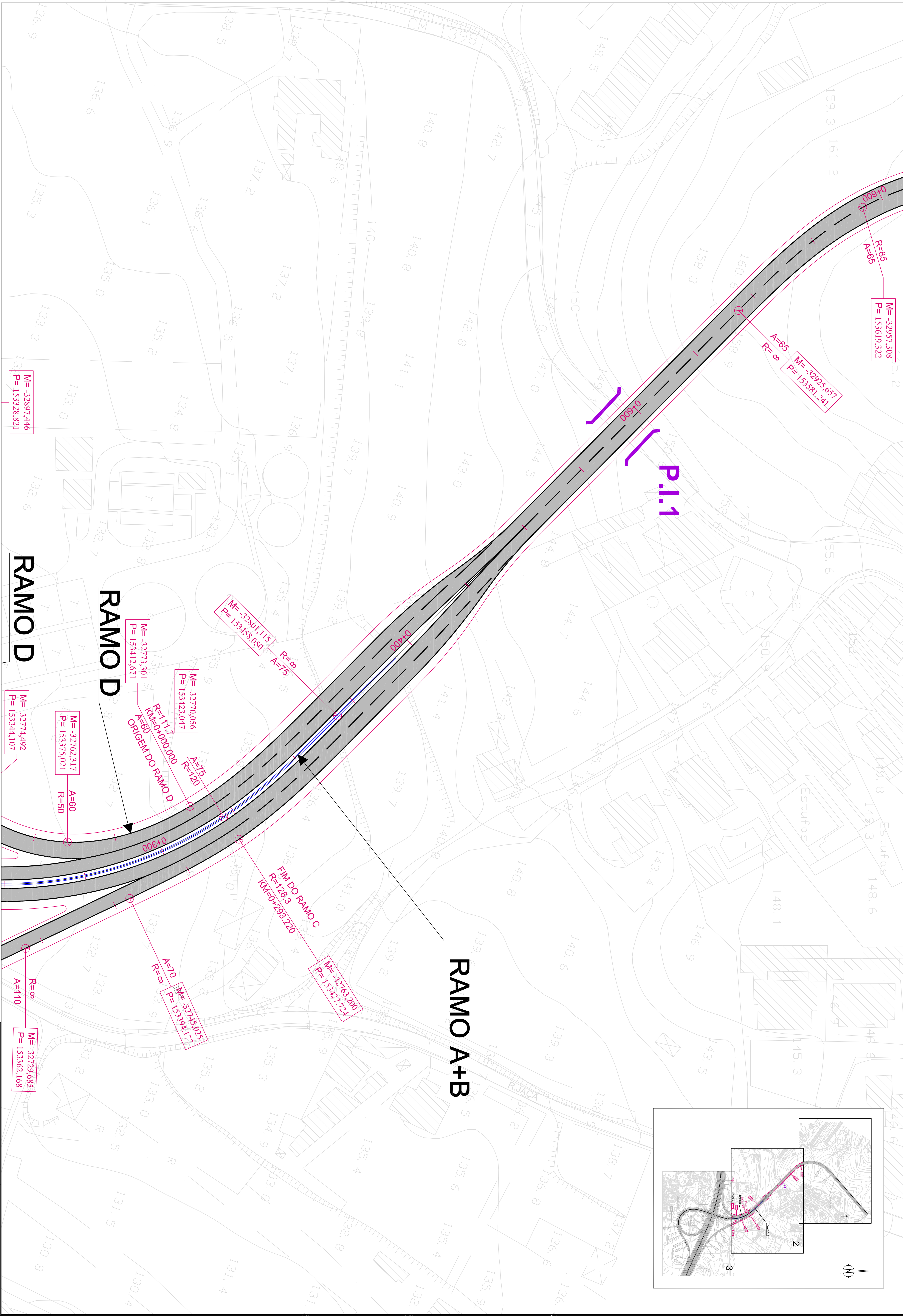
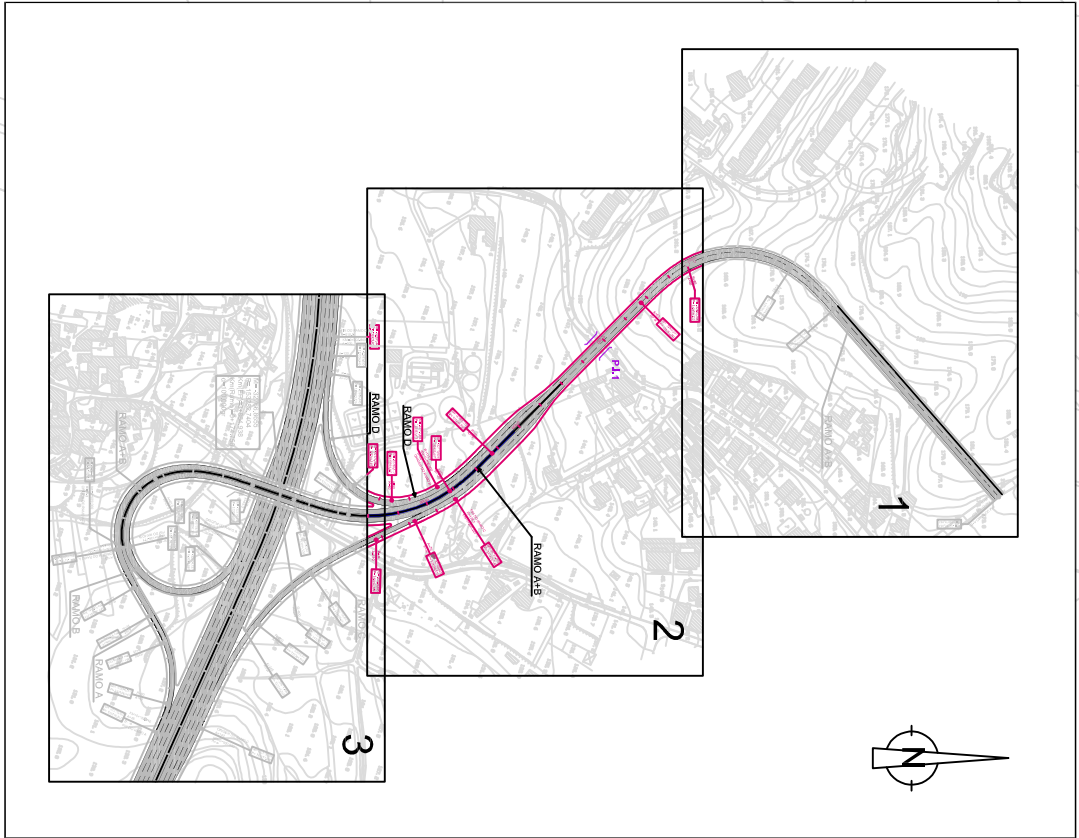
M=-32954,614  
P=153703,201  
R=85  
A=65

M=-32957,308  
P=153619,322  
R=85  
A=65

RAMO A+B

Designação:		PROJECTO DE EXECUÇÃO	
Nº DE LIGAÇÃO EM TROMPETE		Escala Numérica:	
PLANTA DE IMPLANTAÇÃO		1:500	
		Escala Gráfica:	
		0 10 20 30	
		(m)	
		Data:	
		31/03/08	
		Folha:	
		01/03	
		Número:	
		1	





Designação:	PROJECTO DE EXECUÇÃO	Escala Numérica:	1:500
Nº DE LIGAÇÃO EM TROMPETE		Escala Gráfica (m):	0 10 20 30
PLANTA DE IMPLANTAÇÃO		Data:	31/03/08
		Folha:	02/03
		Intervenção:	1



RAMO D

M=-32774,492  
P=153344,107

M=-32866,445  
P=153325,136

FIM DO RAMO D  
R=616.5  
KM=0+202.843  
A=100

M=-32881,335  
P=153326,943  
A=100  
R=8

A=100  
R=8

R=8  
A=70

M=-32750,535  
P=153339,251  
R=120  
A=75

M=-32729,685  
P=153362,168

RAMO C

M=-32700,852  
P=153309,051  
R=200  
A=110

M=-32763,873  
P=153281,694  
R=600  
A=245

M=-32659,377  
P=153264,592  
R=200  
A=140

M=-32671,590  
P=153243,253  
R=245  
A=245

M=-32573,796  
P=153217,383  
R=140  
A=140

M=-32766,8655  
P=153282,7404  
Km(EP)=3+864.938  
Km(Ramo)=0+174.756  
 $\alpha=100.000gr$

M=-32774,732  
P=153260,003  
R=63  
A=63

ORIGEM DO RAMO B  
R=1046.3  
km=0+000.000  
A=36

M=-32728,714  
P=153250,314

M=-32704,727  
P=153236,992  
R=45  
A=36

M=-32724,335  
P=153159,129  
R=45  
KM=0+126.771  
FIM DO RAMO B

M=-32779,967  
P=153179,570  
R=53  
A=63

M=-32721,537  
P=153146,843  
R=45  
A=45  
ORIGEM DO RAMO A

RAMO A+B

M=-32722,934  
P=153153,017

Km=0+000.000  
R=61.3  
ORIGEM DO RAMO A+B

RAMO B

M=-32689,653  
P=153161,306  
R=63  
A=45

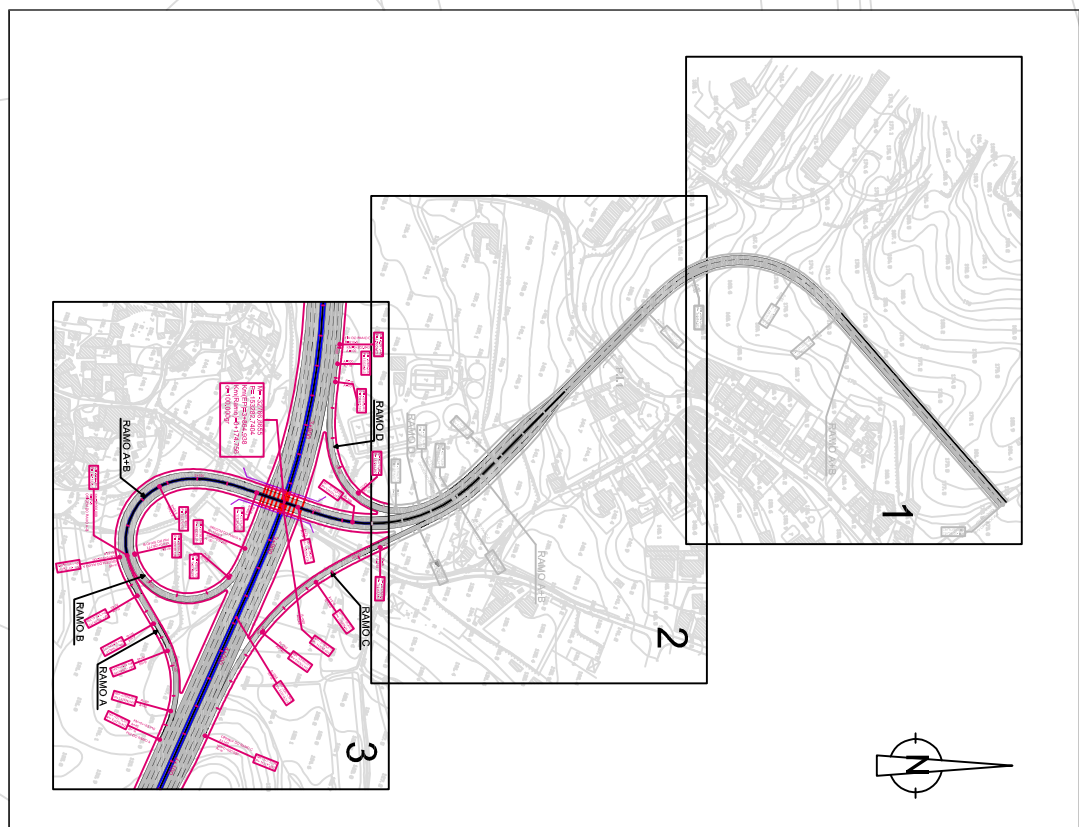
M=-32666,547  
P=153174,772  
R=45  
A=45

M=-32644,060  
P=153186,330  
R=80  
A=45

M=-32594,281  
P=153188,949  
R=80  
A=45

M=-32570,705  
P=153179,812  
R=63  
A=45  
KM=0+163.216  
FIM DO RAMO A

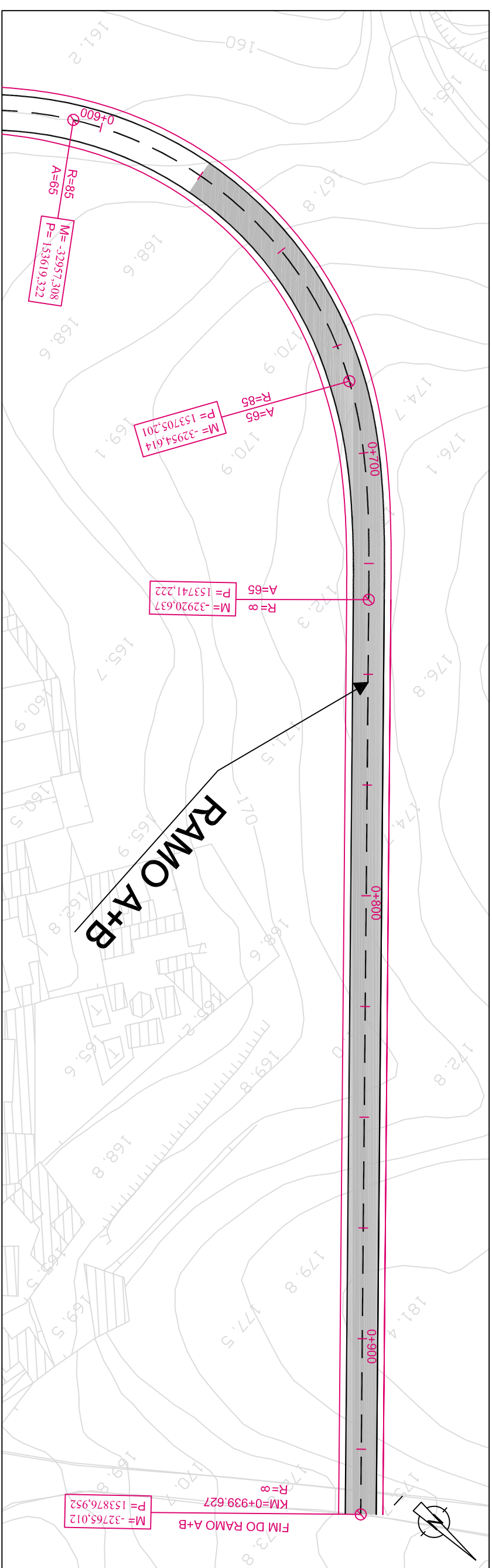
RAMO A



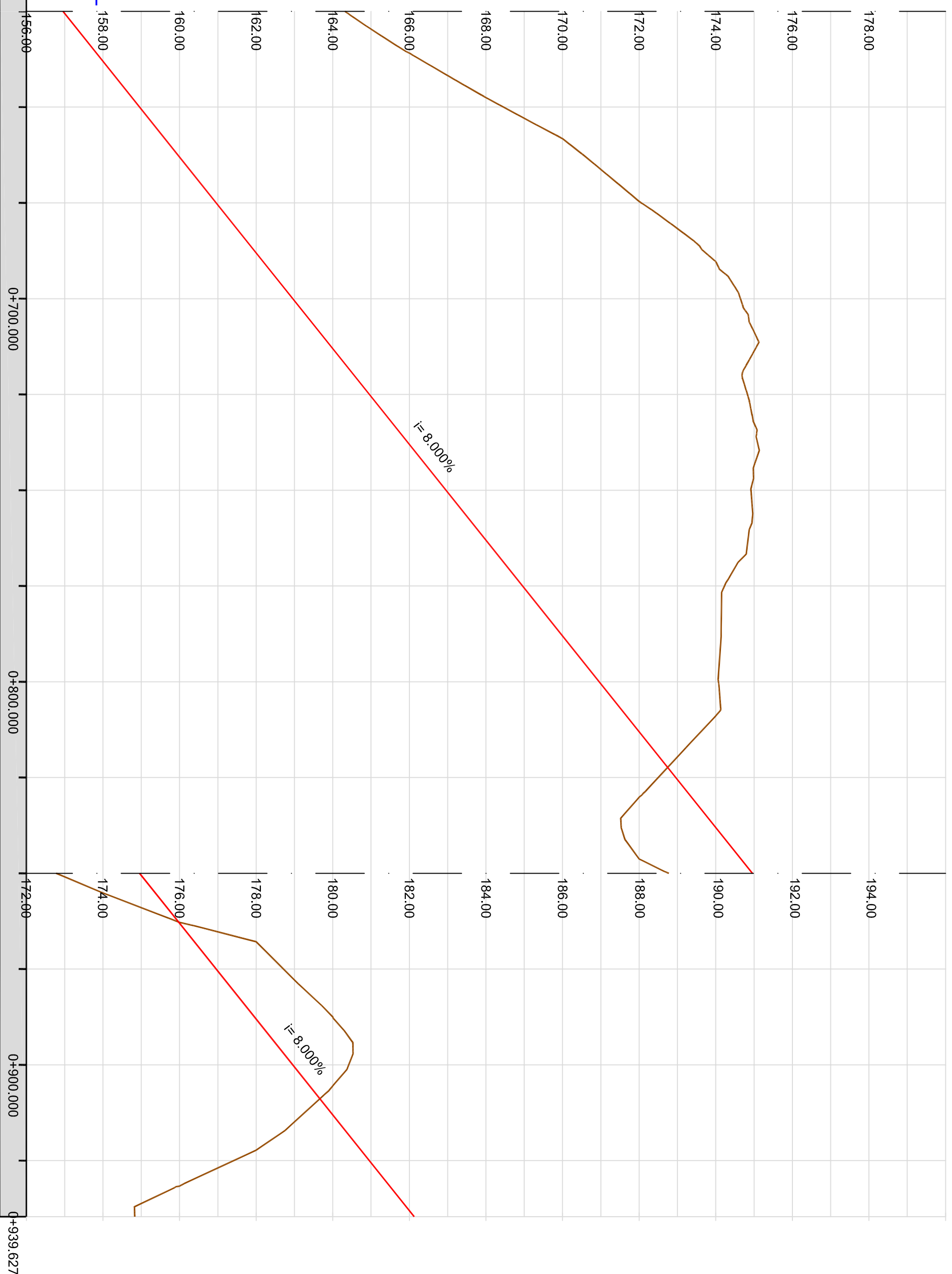









RAMO A+B  
Esc. H=1:1000

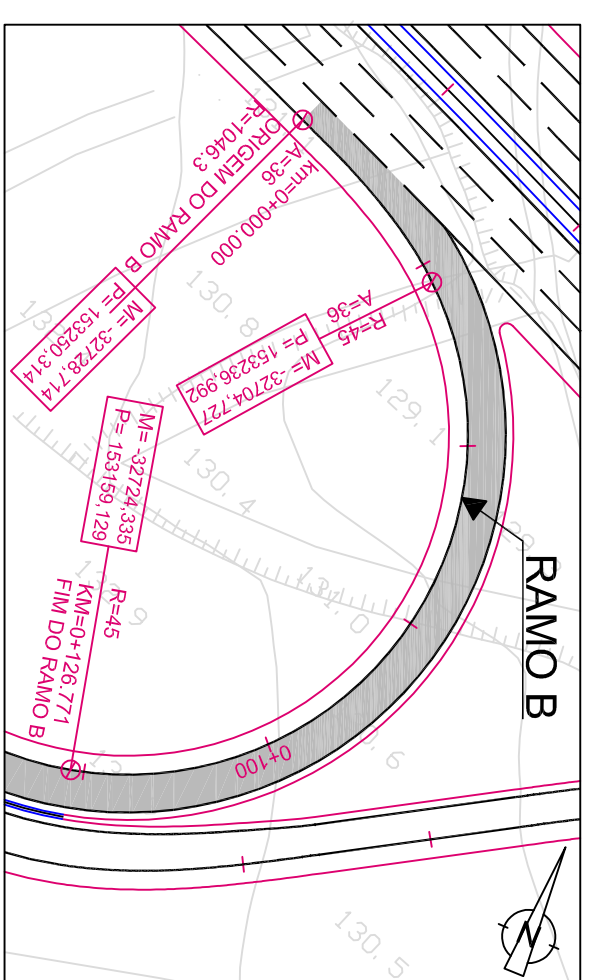


RAMO A+B  
PERFIL LONGITUDINAL

Esc. H=1:1000  
V=1:100

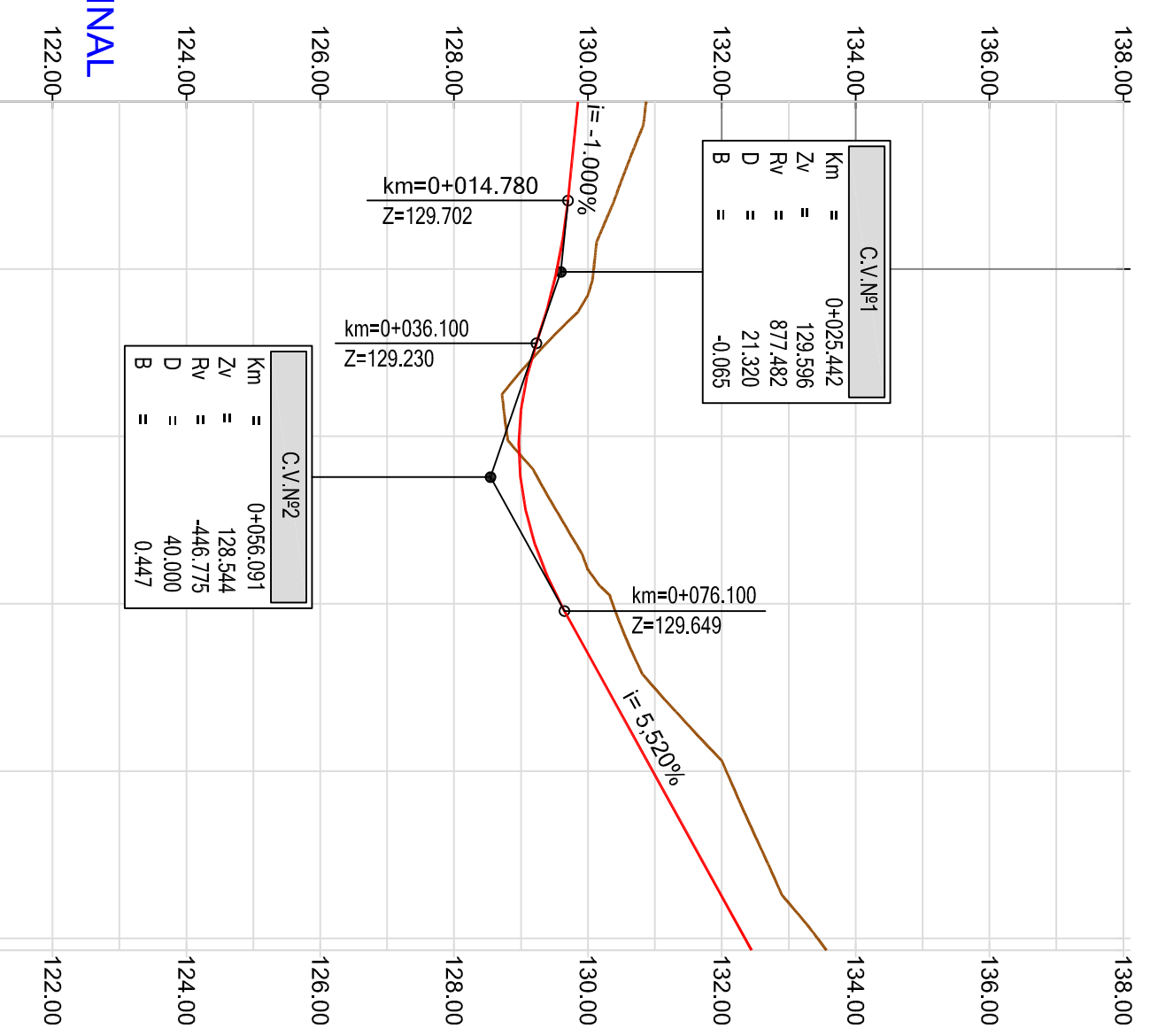
PLANTA		PERFIL LONGITUDINAL	
		0+700.000	0+900.000
COTAS DA RASANTE		156.957	178.957
COTAS DO TERRENO		164.318 168.458 172.056 174.645 174.828 174.919 174.227 174.070 172.498 172.776 178.716 180.418 177.409 174.830	158.957 160.957 162.957 164.957 166.957 168.957 170.957 172.957 174.957 176.957 178.957 180.254
ELEMENTOS DA RASANTE		i = +7.00% - 7.00%	i = -2.50% - 2.50%
SOBRELEVACÃO			
PONTOS NOTÁVEIS		0+683.434	0+733.140
DIAGRAMA DE CURVAS		R=65.000 L=58.435	A=55.000 L=49.706  R=∞ L=206.487

<b>Designação:</b> PROJECTO DE EXECUÇÃO N.º DE LIGAÇÃO EM TROMPETE PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL RAMO A+B - Km 0+625 a Km 0+939,627	<b>Escudo Numérico:</b> V=1:100 H=1:1000	
	<b>Escudo Gráfico:</b> 0 1 2 3  0 10 20 30	<b>Data:</b> 03/03/08 <b>Folha:</b> 02/02 <b>N.º de folhas:</b> 2.4



RAMO B  
Esc. H=1:1000

Esc. H=1:1000



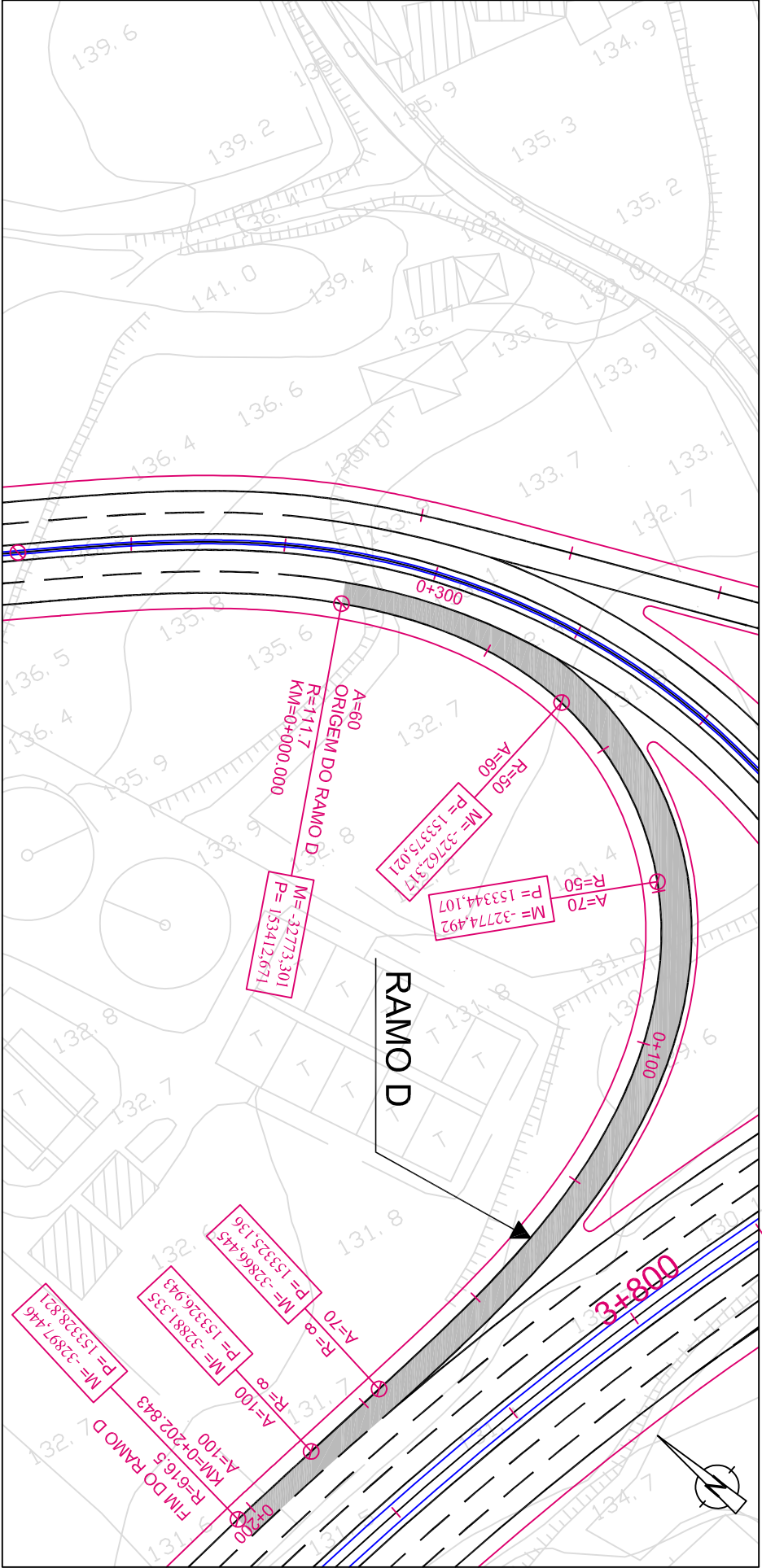
# RAMO B PERFIL LONGITUDINAL

Esc. H=1:1000  
V=1:100

PLANTA		PERFIL LONGITUDINAL				
DIAGRAMA DE CURVAS	QUILOMETRAGEM	0+000,000	0+200,000	0+400,000	0+600,000	0+800,000
	COTAS DA RASANTE	129.850	129.541	128.970	129.589	130.968
	COTAS DO TERRENO	130.873	130.086	128.794	130.370	132.067
					133.564	132.446
	ELEMENTOS DA RASANTE	E= -1,00% R= 877,482 D= 14,780 D= 21,320 R= 446,775 D= 40,000 D= 50,671 I= 5,520% I= 5,00%				
	SOBRELEVACÃO	+5,00% +3,23% +5,00% +5,00%				
	PONTOS NOTÁVEIS	0+21,561				

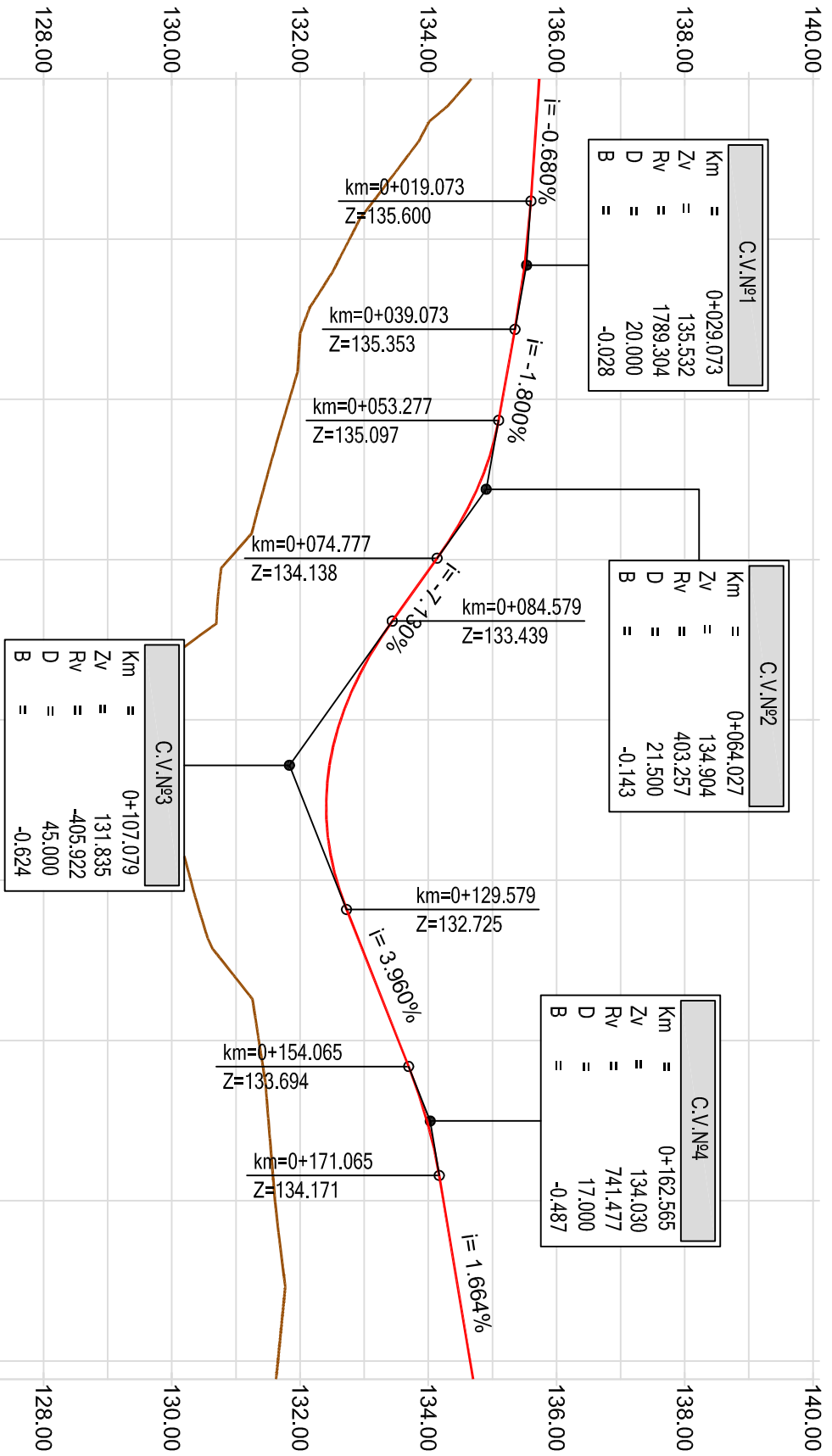
<b>Designação:</b>  PROJETO DE EXECUÇÃO  N.º DE LIGAÇÃO EM TROMPETE  PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL  RAMO B – Km 0+000 a Km 0+126.771	<b>Esboço Numérico:</b>  W=1:100  H=1:100		
	<b>Esboço Gráfico:</b>  (m)		
	0	1	2
	0	10	20
	0	30	30
<b>Data:</b> 01/03/08	<b>Folha:</b> 01/01	<b>Trabalho:</b> 2.2	





### RAMO D

Esc. H=1:1000



### RAMO D

PERFIL LONGITUDINAL

Esc. H=1:1000  
V=1:100

QUILOMETRAGEM		0+000,000	0+100,000	0+202,843
COTAS DA RASANTE		135.730	135.156	134.700
COTAS DO TERRENO		134.674	132.772	131.626
ELEMENTOS DA RASANTE		I=-0,680% D=19,073	I=-1,800% D=21,500	I=-1,664% D=31,775
ELEMENTOS DA RASANTE		I=-0,680% D=19,073	I=-1,800% D=21,500	I=-1,664% D=31,775
SOBRELEVACÃO		I=-3,00% D=19,073	I=-4,00% D=21,500	I=-5,74% D=31,775
PONTOS NOTÁVEIS		0+39,771	0+73,622	0+171,622
PLANTA		A=60,000 L=39,771	R=60,000 D=33,351	A=70,000 L=38,000

Desenho: 31/03/08

Projeto de Execução

Nó de Ligação em Trompette

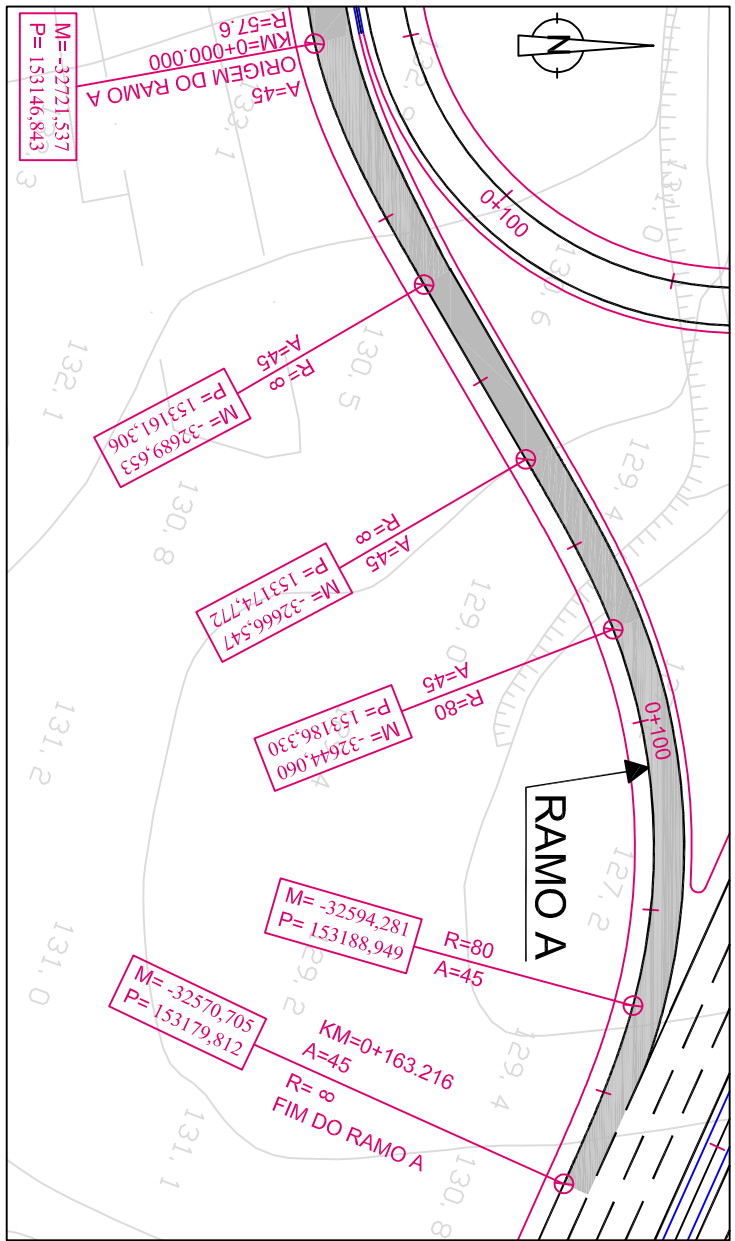
Planta e Perfil Longitudinal

Ramo D - Km 0+000 a Km 0+202,843

Escala: 1:1000

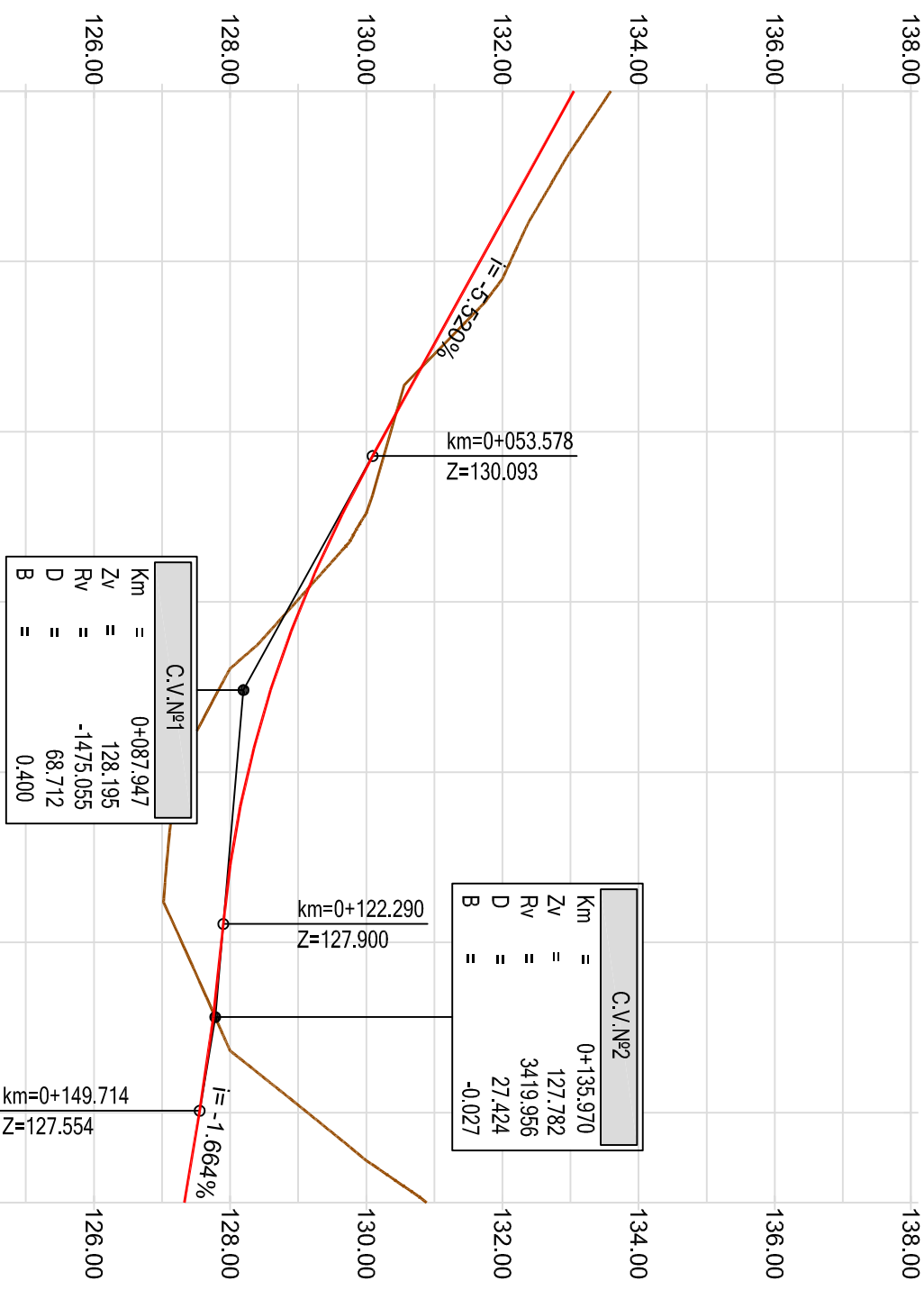
0 1 2 3

Desenho N° 2,6



### RAMO A

Esc. H=1:1000



### RAMO A

PERFIL LONGITUDINAL

Esc. H=1:1000  
V=1:100

QUILOMETRAGEM		0+000,000	0+100,000	0+163,216
COTAS DA RASANTE		133.050	131.670	127.330
COTAS DO TERRENO		133.592	132.117	127.231
ELEMENTOS DA RASANTE		I=-5,520% D=53,578	I=0,00% D=53,578	I=-1,664% D=31,775
ELEMENTOS DA RASANTE		I=-5,520% D=53,578	I=0,00% D=53,578	I=-1,664% D=31,775
SOBRELEVACÃO		I=-5,00% D=53,578	I=0,00% D=53,578	I=-2,50% D=31,775
PONTOS NOTÁVEIS		0+035,156	0+061,899	0+137,903
PLANTA		A=45,000 L=35,156	R=80,000 D=50,691	A=45,000 L=25,313

Desenho: 31/03/08

Projeto de Execução

Nó de Ligação em Trompette

Planta e Perfil Longitudinal

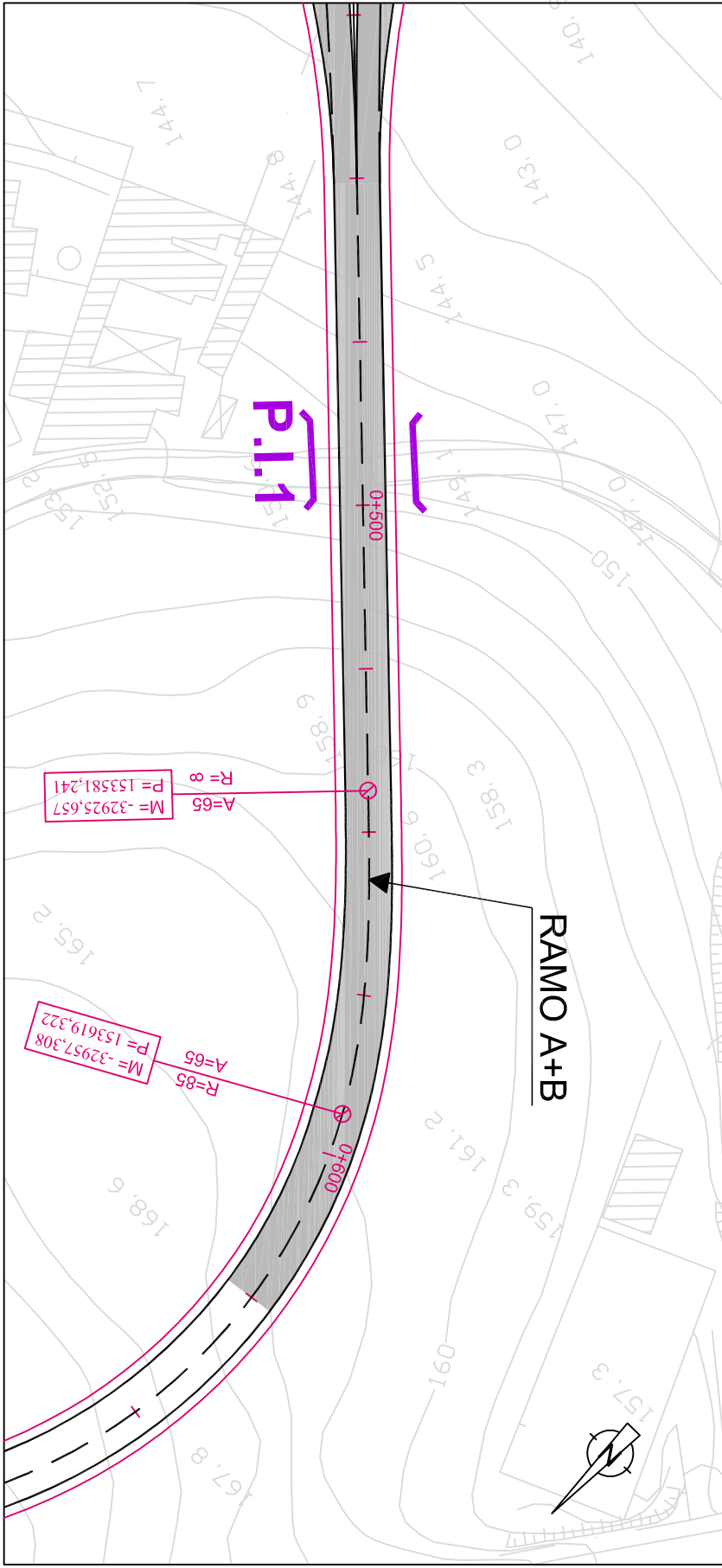
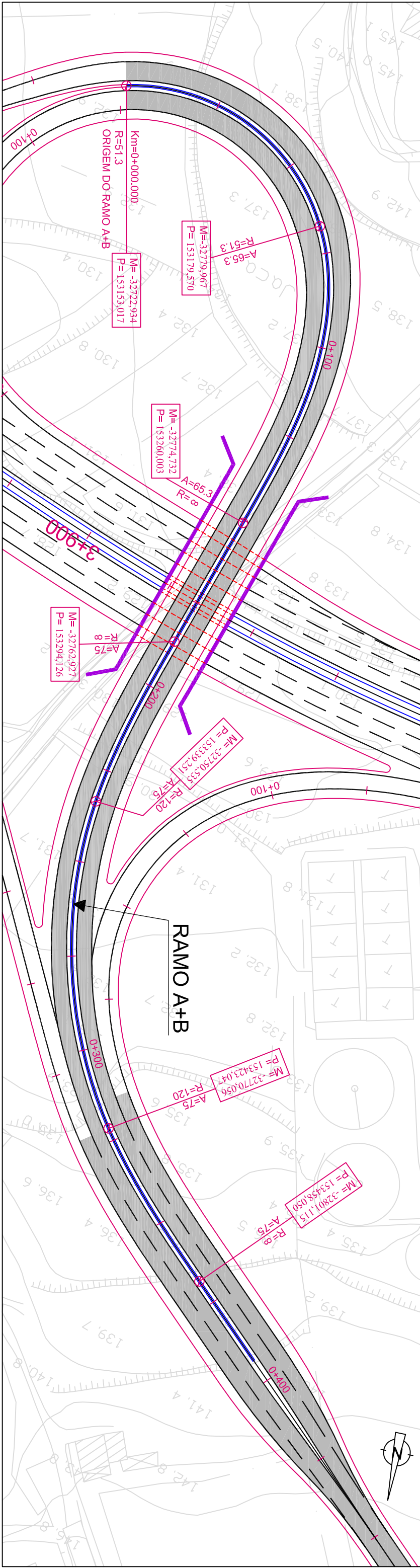
Ramo A - Km 0+000 a Km 0+163,216

Escala: 1:1000

0 1 2 3

Desenho N° 2,3



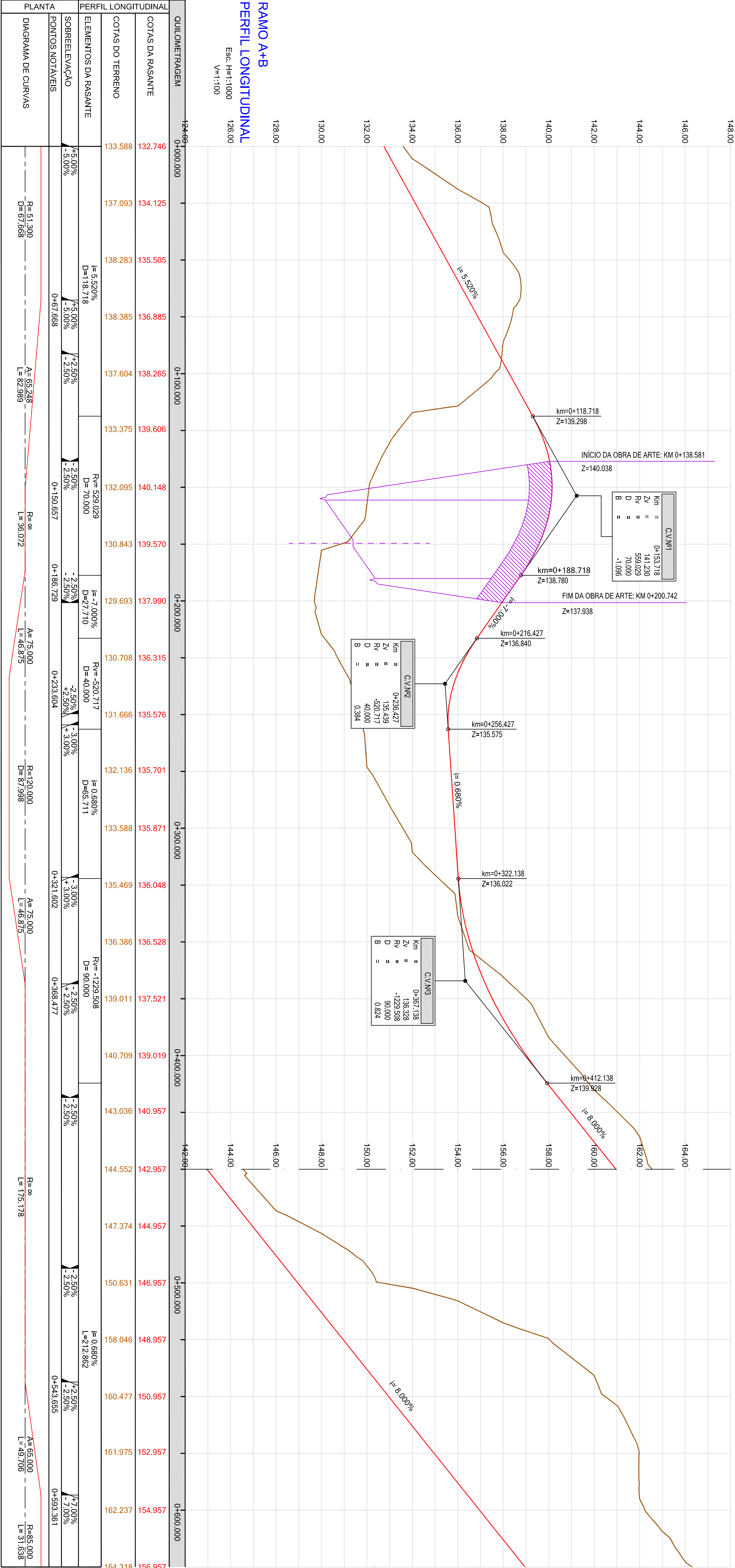


RAMO A+B

Esc. H=1:1000

RAMO A+B  
PERFIL LONGITUDINAL

Esc. H=1:1000  
V=1:100



QUILOMETRAGEM	0+000.000	0+100.000	0+200.000	0+300.000	0+400.000	0+500.000	0+600.000
COTAS DA RASANTE	132.746	134.125	135.505	136.885	138.265	139.606	140.986
COTAS DO TERRENO	133.588	137.093	138.283	138.385	137.604	133.375	139.606
ELEMENTOS DA RASANTE	I=5.000% D=18.718	I=5.000% D=18.718	I=5.000% D=18.718	I=5.000% D=18.718	I=5.000% D=18.718	I=5.000% D=18.718	I=5.000% D=18.718
SOBRELEVACÃO	-5.00%	-5.00%	-5.00%	-5.00%	-5.00%	-5.00%	-5.00%
PONTOS NOTÁVEIS	0+67.668	0+150.657	0+186.729	0+233.604	0+321.602	0+368.477	0+543.655

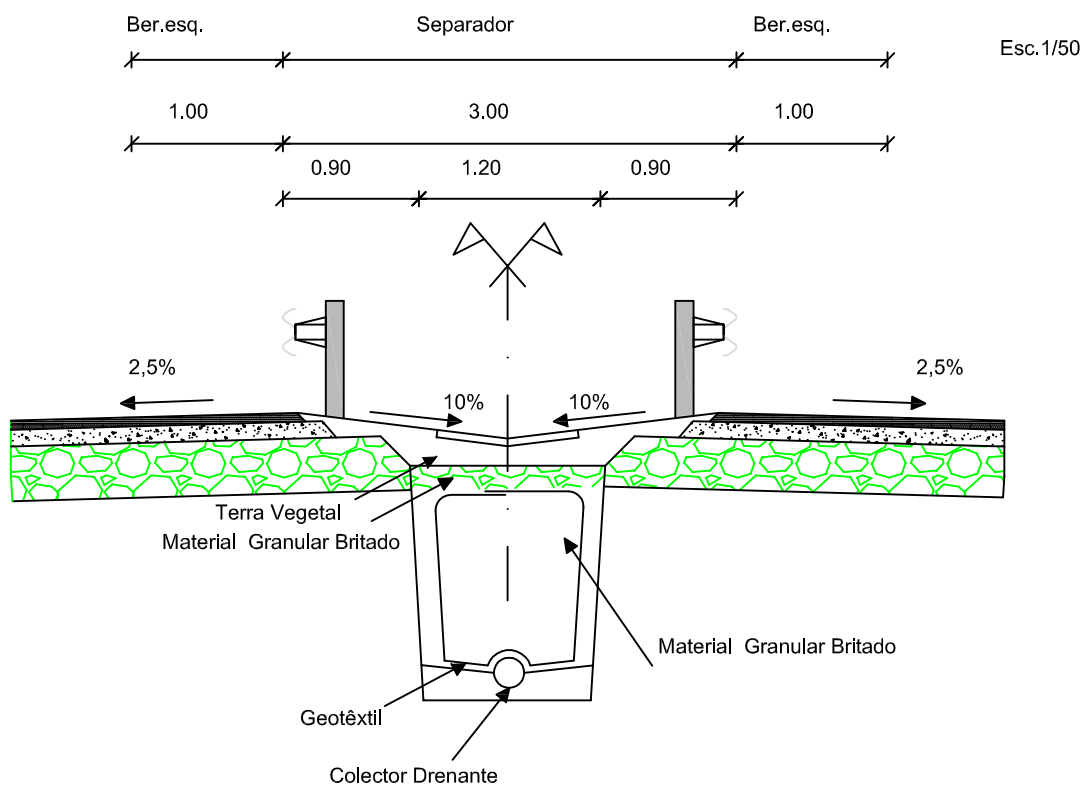
PLANTA	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668
DIAGRAMA DE CURVAS	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668	R=51.300 D=67.668





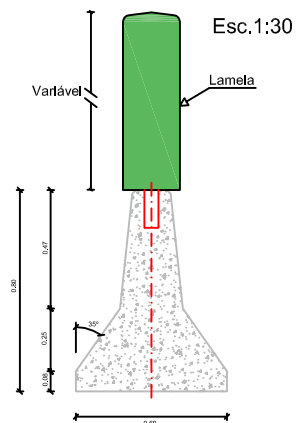


GUARDA DE SEGURANÇA FLEXÍVEL

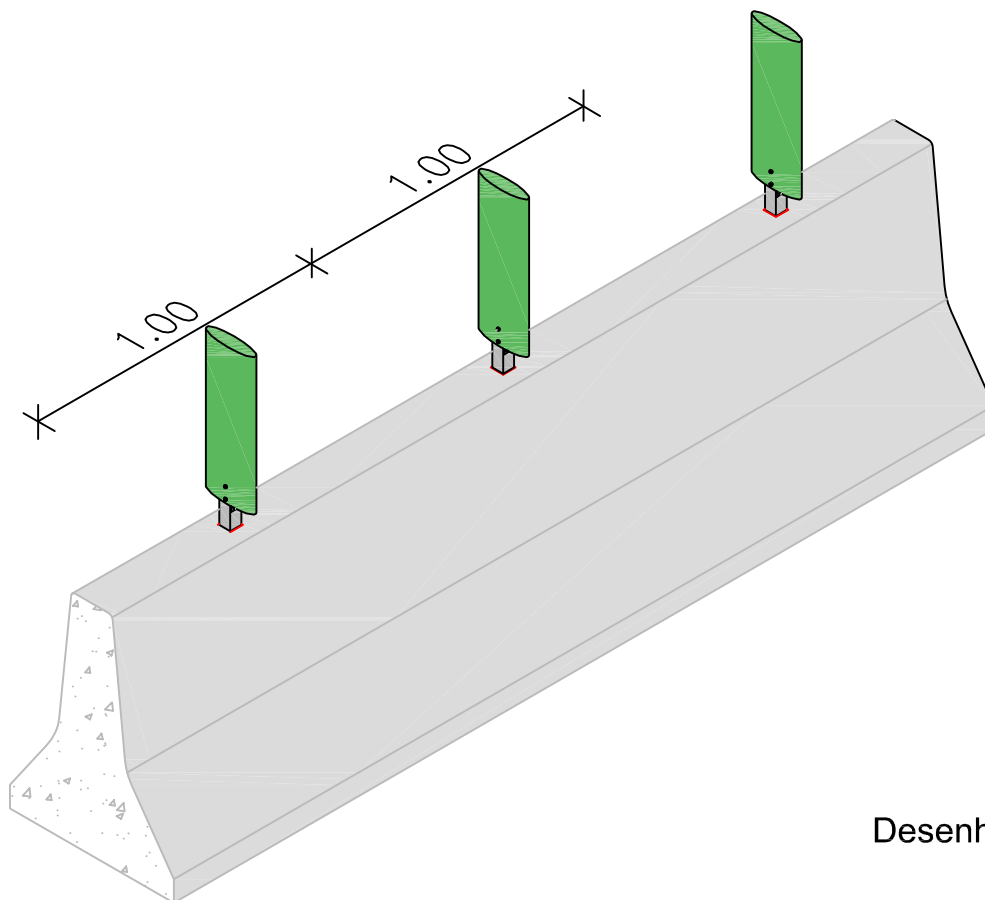


Desenho nº 3.1

## GUARDA DE SEGURANÇA RÍGIDA - "NEW JERSEY"

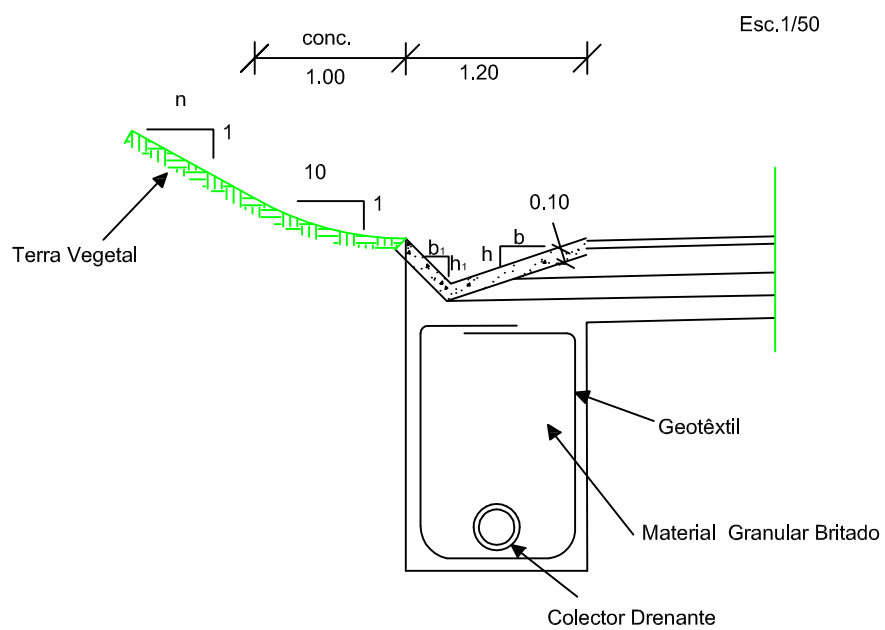


## PERSPECTIVA DA FIXAÇÃO DAS LAMELAS SOBRE O "NEW JERSEY"



Desenho nº 3.2

VALETA DE PLATAFORMA LATERAL REVESTIDA COM BETÃO COM ABERTURA  $\leq 1.20$



Desenho nº 3.3

**PROJECTO DE EXECUÇÃO DE UM NÓ DE  
LIGAÇÃO EM TROMPETE NAS  
ESPECIALIDADES DE GEOMETRIA DO  
TRAÇADO E PAVIMENTAÇÃO**  
Volume II - Pavimentação

**JOÃO PEDRO CAMELO FRAGATA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO**

---

Orientador: Professor Doutor Adalberto Quelhas da Silva França

MARÇO DE 2008

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Pais



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor Adalberto França pelos seus ensinamentos, orientações e disponibilidade demonstradas, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus colegas e amigos pela motivação, simpatia e amizade demonstradas.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, que me incentivaram, apoiaram e me deram a oportunidade de realizar este trabalho de conclusão de curso.



## **RESUMO**

O trabalho de seguida apresentado refere-se ao dimensionamento de um pavimento rodoviário do tipo flexível para o nó de ligação que constitui o caso de estudo do presente projecto. De forma a desenvolver as questões teóricas que estão por trás do estudo da pavimentação e, na sequência de ser um trabalho de fim de curso, o seguinte trabalho não se limita a ser uma Memória Descritiva de um Projecto de Execução. Nele foram incluídos os conceitos teóricos adquiridos na disciplina de Pavimentos II, procurando-se também organizar a informação contida no Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários e no Manual de Concepção de Pavimentos Para a Rede Rodoviária Nacional. Para o dimensionamento expedito do pavimento flexível recorreu-se ao programa de cálculo ALIZÉ, que considera o modelo multi-camadas de Burmister para a análise do estado de tensão/deformação de um pavimento.

Na caracterização do solo de fundação optou-se por seguir a Especificação LNEC E 240 – 1970, enquanto que para a caracterização das misturas betuminosas e do respectivo agregado se recorreu às características possíveis fornecidas pelo Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários, de forma a respeitar o Caderno de Encargos - Tipo das Estradas de Portugal. Para os materiais das camadas granulares, seguiram-se igualmente as imposições expressas no Caderno de Encargos - Tipo das Estradas de Portugal.

**PALAVRAS – CHAVE:** Pavimento Flexível, Mistura Betuminosa, ALIZÉ, Solos, Agregados.

## **ABSTRACT**

The goal of the following work is to define an asphalt concrete for the trumpet interchange. In order to develop the main theoretical issues of asphalt paving and as consequence of being a final work of degree, it is included the theoretical concepts acquired in the discipline of Pavimentos II. It was also organized all the information in the Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários and in the Manual de Concepção de Pavimentos Para a Rede Rodoviária Nacional. In order to make easier all the calculations it was used an informatics program called ALIZÉ which considers the multi-layers of Burmister for analysis the stress/deformation of a pavement.

For characterizing the soil of foundation it was followed the Especificação LNEC E 240-1970, for the bitumen binder and the aggregate it was used the characteristics provided by the Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários always respecting the Caderno de Encargos – Tipo of Estradas de Portugal. For the material of the granular layer it was also used the Caderno de Encargos – Tipo of Estradas de Portugal.

**KEYWORDS:** Asphalt Concrete, Bitumen Binder, ALIZÉ, Soils, Aggregates.

## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. PREÂMBULO .....</b>	<b>2</b>
<b>3. CONCEPÇÃO GERAL .....</b>	<b>4</b>
<b>4. TRÁFEGO .....</b>	<b>5</b>
<b>4.1. GENERALIDADES .....</b>	<b>5</b>
<b>4.2. DISTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO PESADO POR CATEGORIAS .....</b>	<b>5</b>
<b>4.3. ANO-HORIZONTE .....</b>	<b>6</b>
<b>4.4. EIXOS-PADRÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>5. PARÂMETROS RESISTENTES DO PAVIMENTO .....</b>	<b>9</b>
<b>5.1. SOLOS .....</b>	<b>9</b>
5.1.1. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO .....	9
5.1.2. DETERMINAÇÃO DO CBR .....	10
<b>5.2. CAMADAS BETUMINOSAS .....</b>	<b>13</b>
5.2.1. GENERALIDADES .....	13
5.2.2. TEMPERATURA .....	14
5.2.3. FREQUÊNCIA .....	14
5.2.4. CONSTITUINTES E PARÂMETROS RESISTENTES DAS MISTURAS BETUMINOSAS .....	16
5.2.4.1. Constituição do betão betuminoso com ligante modificado .....	17
5.2.4.2. Constituição do macadame betuminoso com características de base .....	17
5.2.4.3. Parâmetros resistentes das misturas betuminosas .....	18
<b>5.3. CAMADAS GRANULARES .....</b>	<b>19</b>
5.3.1. GENERALIDADES .....	19
5.3.2. CONSTITUIÇÃO DA CAMADA GRANULAR .....	20
5.3.3. PARÂMETROS RESISTENTES DA CAMADA GRANULAR .....	20
<b>6. PERFIL TRANSVERSAL TIPO .....</b>	<b>22</b>
<b>6.1. CAMADA DE DESGASTE EM BETÃO BETUMINOSO COM LIGANTE MODIFICADO (BB-D) ....</b>	<b>22</b>
<b>6.2. MACADAME BETUMINOSO EM CAMADA DE BASE (MB-B) .....</b>	<b>23</b>

<b>6.3. BASE EM AGREGADO BRITADO DE GRANULOMETRIA EXTENSA (MGE)</b> .....	23
<b>7. REGAS BETUMINOSAS DE IMPREGNAÇÃO E COLAGEM</b> .....	24
<b>7.1. REGA DE IMPREGNAÇÃO BETUMINOSA</b> .....	24
<b>7.2. REGA DE COLAGEM</b> .....	25
<b>8. VERIFICAÇÕES ESTRUTURAIS</b> .....	26
<b>8.1. FADIGA POR TRACÇÃO</b> .....	27
<b>8.2. DEFORMAÇÃO PERMANENTE</b> .....	28
<b>9. RESUMO</b> .....	30
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	31
<b>ANEXOS</b> .....	32
<b>A.1 – ENSAIOS</b> .....	33
A.1.1. – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	34
A.1.2 – LIMITES DE CONSISTÊNCIA DE ATTERBERG .....	35
A.1.3 – ENSAIO CBR.....	36
A.1.4 – ENSAIO DE PROCTOR.....	37
<b>A.2 – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO</b> .....	38
A.2.1. – QUADRO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS SEGUNDO A ESPECIFICAÇÃO LNEC E 240-1970 ...	39
<b>A.3 – PROGRAMA DE CÁLCULO ALIZÉ</b> .....	40
A.3.1. – RESULTADOS DO PROGRAMA DE CÁLCULO ALIZÉ .....	41

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Fig. 1- Gráfico do peso específico em função do CBR.....	12
Fig. 2- Tensão introduzida por um pneu. ....	14
Fig. 3 – Perfil transversal tipo do pavimento. ....	22
Fig. 4 – Estrutura flexível seleccionada, testada e verificada. ....	30

## **ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 1 – Distribuição de Pesados por Categorias – TMDP. ....	5
Quadro 2- Número Acumulado de Veículos. ....	7
Quadro 3– Espectros de Carga.....	7
Quadro 4 - Eixos – Padrão ( $N_{130}$ ).....	8
Quadro 5 – Reconfirmação dos valores referentes a cada mistura betuminosa.....	18
Quadro 6 – Verificação das extensões. ....	29

## **SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

E.P. – Estradas de Portugal;

TMDP – Tráfego Médio Diário de Pesados;

MCPRRN – Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional;

MDPR – Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários;

APORBET – Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosa;

LNEC – Laboratório de Engenharia Civil;

E.A. – Ensaio Equivalente de Areia.

# 1

## INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como principal objectivo o dimensionamento de um pavimento rodoviário do tipo flexível, tendo como base o Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários. Para a sua elaboração foram desenvolvidas as seguintes etapas:

1. Determinação das solicitações referentes ao tráfego (número acumulado de passagens equivalentes do eixo-padrão de cálculo);
2. Definição dos parâmetros resistentes do pavimento, nomeadamente, os do solo de fundação, os das camadas granulares e os das camadas betuminosas. Os materiais são geralmente caracterizados através dos seguintes parâmetros elásticos:
  - Coeficiente de Poisson ( $\nu$ );
  - Módulo de Deformabilidade\* (E).
3. Adopção de uma estrutura laminar estratificada, em face das condições locais e dos materiais disponíveis;
4. Cálculo das tensões e deformações instaladas em pontos críticos;
5. Comparação das tensões e deformações calculadas com as máximas admissíveis.

Tratando-se de um pavimento flexível, compararam-se as extensões horizontais de tracção na base das camadas betuminosas e as extensões verticais de compressão à superfície do terraplino com os valores máximos admissíveis. Consideraram-se os dois critérios básicos de ruína para os pavimentos rodoviários:

- Fadiga por tracção no fim das camadas betuminosas;
- Deformação permanente na superfície do solo de fundação;

Se as tensões e deformações forem maiores que as admissíveis repete-se o processo.

---

\* O Módulo de Deformabilidade também se pode designar por Módulo de Rigidez, pois pretende quantificar uma resistência à tracção na flexão. No caso dos solos, pode-se designar por módulo de resiliência, [1].



# 2

## PREÂMBULO

Um pavimento rodoviário deverá garantir a circulação dos veículos de um modo seguro e cómodo durante o seu período de vida útil, estando sujeito, fundamentalmente, a acções provocadas pelo tráfego e pelas condições climáticas.

No presente caso, devido à sua geometria difícil, é desaconselhável o uso de estruturas rígidas ou mistas com camadas de fundação que usem ligantes hidráulicos, pelo que a solução adoptada foi a de uma estrutura de pavimento estratificada, do tipo flexível, que se apoia de uma forma contínua sobre um solo de fundação. Este tipo de pavimentos caracteriza-se por deflexões elevadas em pequenas áreas, garantindo uma resistência à tracção e, ao mesmo tempo, proporcionando uma degradação de cargas para que a tensão no solo de fundação não exceda os limites da sua resistência.

Os pavimentos flexíveis são constituídos por diversas camadas. Numa parte superior, tem-se a fracção dos materiais betuminosos do pavimento, podendo ser constituída por uma camada de desgaste que se apoia sobre uma de regularização ou ligação. A estas, segue-se uma base, podendo ser ainda uma mistura betuminosa, se as condições assim o exigirem, ou uma camada granular com o agregado estabilizado mecanicamente. Eventualmente, poder-se-á complementar a camada anterior com uma sub-base granular. Finalmente, esta estrutura assenta no leito do pavimento.

As misturas betuminosas são essencialmente constituídas por areias, britas, gravilhas, filer e betume. Sempre que se torne necessário melhorar a adesividade de betume-agregado, regular o tempo de rotura da emulsão ou melhorar a trabalhabilidade, incorporam-se aditivos especiais. De uma forma aproximada, as misturas betuminosas a quente são constituídas por 92%, em peso, de agregados de granulometria pré-estabelecida, filer e aditivos, sendo os restantes 8% de betume, [2]. Os betumes designados “puros”, que se obtêm por destilação directa do petróleo bruto, possuem uma cor negra e muita viscosidade. A principal função do betume em serviço é impermeabilizar e ligar os agregados, enquanto que na fase de compactação actua como lubrificante. Já o filer preenche os vazios de pequenas dimensões e estabiliza o ligante. O comportamento do betume depende essencialmente da temperatura, do tempo da acção da carga e da percentagem volumétrica de agregados e betume. Em certas ocasiões, são utilizadas emulsões betuminosas como ligante, podendo, neste caso, as misturas betuminosas serem aplicadas a frio.

Resumindo, os principais objectivos de uma mistura betuminosa são:

- Resistir à deformação permanente e ao fendilhamento por fadiga;
- Possuir trabalhabilidade;
- Ser impermeável e durável;
- Apresentar boa flexibilidade na interface pneu/pavimento;

- Garantir boa aderência;
- Ser resistente ao rolamento;
- Permitir um nível sonoro aceitável e boa qualidade de condução;
- Garantir uma manutenção fácil e barata;
- Contribuir para a resistência do pavimento.

O dimensionamento de um pavimento flexível é bastante complexo, sendo utilizados métodos e programas de cálculo automático que permitem um dimensionamento expedito. Geralmente os programas de cálculo têm por base o modelo de Burmister, em que todas as camadas são tratadas como sólidos elásticos considerando se são ligadas ou não. O programa de cálculo utilizado foi o ALIZÉ, que considera o modelo multi-camadas de Burmister para a análise do estado de tensão/deformação de um pavimento.

# 3

## CONCEPÇÃO GERAL

Em termos de Projecto de Pavimentação existem certas condicionantes do local a considerar:

- A velocidade dos veículos pesados considerada para efeitos de dimensionamento foi de 30 Km/h, devido às características de curvatura em planta e inclinações em perfil\*;
- Não existirá uma especial incidência de trânsito com carga ilegal no local, adoptando-se as percentagens de veículos com carga ilegal mais frequentes a nível nacional;
- O solo de fundação para suporte de pavimento apresentará boa qualidade, situação já confirmada pelos estudos geotécnicos fornecidos.

Como foi referido anteriormente e, segundo os condicionamentos atrás referidos, a solução adoptada foi a de uma estrutura de pavimento estratificada do tipo flexível. Note-se que, a boa qualidade do solo de fundação não pressupõe bases granulares espessas.

---

\* As tabelas fornecidas pelo MDPR são também para frequências de 5Hz (V=30 Km/h), o que facilita os cálculos se se optar por uma velocidade de 30 Km/h.

# 4

## TRÁFEGO

### 4.1. GENERALIDADES

Um veículo ao deslocar-se num pavimento rodoviário transmite-lhe esforços verticais, devido ao seu peso, e tangenciais devido a acelerações, frenagens, rolamentos e derrapagens. Para o dimensionamento estrutural, as acções verticais são as mais determinantes. Deste modo, é necessário calcular o número acumulado de veículos para o ano horizonte escolhido e as cargas por tipo de eixo, bem como definir o agrupamento do tráfego nas suas respectivas categorias. Estas são definidas pela Estradas de Portugal e as que interessam ao dimensionamento de pavimentos são as correspondentes aos veículos pesados (F, G, H e I). As percentagens para cada categoria e os valores mais frequentes a nível nacional são expressos no quadro do espectro de cargas, posteriormente apresentado.

A pequena dimensão da zona a estudar e a uniformização do tráfego existente não justificam o uso de estruturas diferenciadas, evitando-se assim os problemas construtivos de transição.

No Estudo de Tráfego efectuada foi desenvolvida a seguinte metodologia:

- Análise dos dados disponíveis sobre os volumes de tráfego fornecidos;
- Distribuição do tráfego pesado segundo as categorias da E.P.;
- Previsão da evolução da procura de tráfego para o Ano Base 2008 e durante o período de 20 anos, para veículos pesados;
- Cálculo do número acumulado de eixos-padrão de 130 KN para as categorias de tráfego pesado consideradas.

### 4.2. DISTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO PESADO POR CATEGORIAS

No quadro seguinte, retirado do Estudo de Tráfego efectuada, resumem-se os valores da distribuição do tráfego pesado por categorias.

Quadro 1 – Distribuição de Pesados por Categorias – TMDP.

TMDP								TOTAL	
F		G		H		I			
Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
87	33	13	5	116	44	48	18	264	100

### 4.3. ANO-HORIZONTE

O ano-horizonte situar-se-á 20 anos após o ano de abertura ao tráfego, [3]. Porém, a prática corrente de 20 anos para a localização do ano-horizonte é susceptível de algumas críticas, tais como:

- A dificuldade de manutenção das condições legais de cargas por eixo durante um longo período;
- A dificuldade na previsão dos volumes acumulados efectuada para 20 anos;
- A dificuldade em prever certas acções climáticas excepcionais, já que a sua probabilidade de ocorrência é maior num período mais longo, causando dano nas estruturas de pavimentação, sem que o volume de tráfego seja relevante nessa degradação;
- A frequência média de renovação da camada de desgaste em pavimentos flexíveis é de uma em cada dez anos. No caso em questão, o mais provável é ocorrer ruína por fadiga na interface das camadas betuminosas, visto que o solo de fundação aparenta ser de boa qualidade. Deste modo, no final do período de vida útil, a renovação será apenas das camadas superiores.

Considerando, apesar de tudo, o período de vida útil de 20 anos e uma taxa de crescimento de tráfego de 3% ( $TMDP < 300$ ) calcula-se o número de acumulados de pesados pela seguinte relação, [3]:

$$N_{\text{acumulado}(20 \text{ anos})} = N^{\circ}_{TMDP} \cdot 365 \cdot \sum_{i=0}^{i=19} (1 + t)^i \quad (1)$$

$N^{\circ}_{TMDP}$ - Tráfego Médio Diário de Pesados;

t – Taxa de crescimento anual.

Então,

$$N_{\text{acumulado}(20 \text{ anos})} = 264.365 \cdot \sum_{i=0}^{i=19} (1 + 0,03)^i = 2,59 \cdot 10^6 \text{ veículos}$$

Como os ramos de ligação têm uma largura máxima de 5 m, considerou-se que o tráfego pesado passará na mesma fatia de pavimento, não sendo considerado o factor de dispersão lateral.

No Quadro 2, da página seguinte, estão presentes o número de veículos consoante as categorias consideradas.

Quadro 2- Número Acumulado de Veículos.

Categorias	% Do Tráfego	% Na Categoria	% Sobre o TMDP	Nº de Acumulados de Pesados (x 10 <sup>5</sup> )
F1	33	73	24,09	6,24
F2		27	8,91	2,31
G1		40	2,00	0,52
G2	5	40	2,00	0,52
G3		20	1,00	0,26
H2		40	17,60	4,56
H3	44	33	14,52	3,76
H5		27	11,88	3,08
I1		100	18,00	4,66
			TOTAL	25.89

#### 4.4. EIXOS-PADRÃO

Os quadros que se seguem permitem o cálculo acumulado de eixos-padrão de 130 KN para as categorias de tráfego pesado consideradas, utilizando o Espectro Modelizado de Cargas por Eixo recomendado pelo Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários. Considerou-se que grande parte dos veículos tinha valores próximos dos limites legais estabelecidos para cada tipo de eixos e, como referido anteriormente, não existirá uma especial incidência de trânsito ilegal no local, adoptando-se as percentagens de veículos com carga ilegal mais frequente a nível nacional. Por último, achou-se razoável que 20% dos veículos irão circular vazios.

Quadro 3– Espectros de Carga.

Categoria	Nº Acumulado (x 10 <sup>5</sup> )	Veículo Carregado		Veículo Vazio		Cargas Ilegais	
		Espectro	% Sobre N	Espectro	% Sobre N	Espectro	% Sobre N
F1	6,24	4s+12s (79,5%)	19,15	4s+4s (20%)	4,82	5s+14s (0,5%)	0,12
F2	2,31	4s+20t (79%)	7,04	4s+4s (20%)	1,78	5s+25t (1,0%)	0,09
G1	0,52	4s+12s+12s+12s ( 78%)	1,56	3s+3s+3s+3s (20%)	0,4	5s+14s+14s+14s (2,0%)	0,04
G2	0,52	4s+12s+9s+15t (78%)	1,56	3s+3s+3s+3t (20%)	0,4	5s+14s+10s+18t (2,0%)	0,4
G3	0,26	4s+20t+12s+12s (78%)	0,78	3s+3t+3s+3s (20%)	0,2	5s+25t+14s+14s (2,0%)	0,02
H2	4,56	4s+10s+20t (77%)	13,55	4s+4s+4s (20%)	3,52	5s+14s+28t (3,0%)	0,53
H3	3,76	4s+10s+24tr (76%)	11,04	4s+4s+4tr (20%)	2,90	4s+14s+32tr (4,0%)	0,58
H5	3,08	5s+20t+20t (75%)	8,91	4s+4t+4t (20%)	2,38	5s+25t+26t (5,0%)	0,59
I1	4,66	5s+12s (80%)	14,40	5s+9s (20%)	3,60	-	
<b>TOTAL</b>	<b>25,89</b>		<b>78</b>		<b>20</b>		<b>2</b>

Quadro 4 - Eixos – Padrão (N<sub>130</sub>).

Eixo Tipos	% Sobre N	Eixos – Padrão (x10 <sup>3</sup> )
3s	3,40	0,25
4s	87,20	20,24
5s	28,70	16,26
9s	5,16	30,69
10s	24,99	22,65
12s	41,35	777,25
14s	1,79	62,33
3t	0,60	0,00
4t	4,76	0,12
15t	1,56	7,56
18t	0,40	4,02
20t	39,19	600,00
25t	0,70	26,16
26t	0,59	25,80
28t	0,53	31,17
4tr	2,90	0,04
24tr	11,04	207,52
32tr	0,58	34,46
TOTAL (Nreal) :		<b>1866,52</b>

Segundo o MDPR, o número equivalente de eixos-padrão de 130 KN para cada tipo de eixo é dado por:

$$\text{Eixo Simples: } N_{130} = N_{\text{acumulado (20 anos)}} \cdot \left[ \frac{P(\text{KN})}{130} \cdot K_s \right]^4, K_s=1;$$

$$\text{Eixo Tandem: } N_{130} = N_{\text{acumulado (20 anos)}} \cdot \left[ \frac{P(\text{KN})}{130} \cdot K_t \right]^4, K_t = 0,57;$$

$$\text{Eixo Tridem: } N_{130} = N_{\text{acumulado (20 anos)}} \cdot \left[ \frac{P(\text{KN})}{130} \cdot K_{tr} \right]^4, K_{tr} = 0,5.$$

Valores Finais:

Número Acumulado de Pesados = **2,59 . 10<sup>6</sup> veículos**

Número equivalente de eixos-padrão de 130 KN = **1,87 . 10<sup>6</sup> eixos-padrão**

Com os valores de tráfego obtidos calcula-se o factor de agressividade:

$$\text{Factor de agressividade} = \frac{N_{130}}{N_{\text{acumulado (20 anos)}}} = \frac{1,87 \cdot 10^6}{2,59 \cdot 10^6} \cong 72\%$$

Segundo o MCPRRN, o factor de agressividade médio considerado para um TMDP entre 150 e 300 veículos é de 60%, ligeiramente inferior aos 72%. Porém, os factores de agressividade fornecidos pelo Manual resultaram de valores obtidos em estações de pesagem e tiveram em atenção a ocorrência de eixos sobrecarregados. Contudo, como 72 % é maior que 60%, está-se pelo lado da segurança.

# 5

## PARÂMETROS RESISTENTES DO PAVIMENTO

### 5.1. SOLOS

Segundo o relatório geológico – geotécnico, o solo foi submetido aos seguintes ensaios:

- Análise Granulométrica (Anexo A.1.1);
- Limites de Consistência de Atterberg (Anexo A.1.2);
- Proctor (Anexo A.1.3);
- CBR (Anexo A.1.4).

#### 5.1.1. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

A classificação do solo foi feita através da Especificação E LNEC 240 – 1970, com base nos resultados dos ensaios realizados. Para isso, utilizou-se o quadro de classificação dos solos apresentado no Anexo A.2.1, procurando, a partir da esquerda para a direita, o primeiro grupo que satisfaça os resultados dos ensaios.

Pela curva granulométrica do solo (Anexo A.1.1), verifica-se que:

- 13% das partículas passam no peneiro de 0,074 mm (nº 200) ASTM;
- 26% das partículas passam no peneiro de 0,420 mm (nº40) ASTM;
- 51% das partículas passam no peneiro de 2,00 mm (nº10) ASTM.

Como 35% ou menos de partículas passam no peneiro de 0,074 mm (nº200), o solo é classificado como um material granular; o solo A-3 é excluído porque o limite máximo de passados é de 10%.

Analisando os limites de consistência de Atterberg (Anexo A.1.2), chegou-se aos seguintes valores:

$W_L = 41\%$  (Limite de Liquidez)

$W_P = 31\%$  (Limite de Plasticidade)



$$I_p = W_L - W_p = 10 \text{ (Índice de Plasticidade)}$$

$W_L$  [%] – Limite de Liquidez. Entende-se por limite de liquidez o teor de humidade que marca a transição do estado plástico para estado líquido;

$W_p$  [%] – Limite de Plasticidade. Entende-se por limite de plasticidade o teor de humidade que marca a transição do estado semi-sólido para o estado plástico;

$I_p$  [%] – Índice de Plasticidade. Entende-se por índice de plasticidade a diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade, correspondendo ao intervalo em que o solo tem um comportamento plástico.

Analisando o quadro de classificação dos solos, observa-se que o solo com um índice de plasticidade máximo de 10% e um limite de liquidez no mínimo de 41%, se ajusta ao solo em análise.

Resumindo, a classificação do solo, segundo a Especificação LNEC E 240-1970, corresponde a: **A -2-5 (0)** – Seixo e areia siltosos ou argilosos.

O índice de grupo indica-se entre parêntesis. Este pretende caracterizar melhor os materiais granulares argilosos e os materiais silto – argilosos e pode dizer-se que a capacidade de suporte do material sob o pavimento varia na razão inversa do seu índice de grupo. O valor 0 indica que o material é excelente.

Em síntese, o solo classificado como sendo do tipo A-2-5 (0) é constituído por vários materiais granulares, contendo 35% ou menos de partículas que passam no peneiro de 0,074 mm (nº200) ASTM. A fracção que passa no peneiro de 0,420 mm (nº40) ASTM tem características de um solo siltoso, não plástico ou moderadamente plástico.

Para a medir a capacidade de suporte do solo foram usados os resultados dos ensaios PROCTOR e CBR. De seguida, encontra-se o processo para a determinação do CBR segundo a Especificação LNEC E 198-1967.

#### 5.1.2. DETERMINAÇÃO DO CBR

O CBR (California Bearing Ratio) é uma medida convencional aferidora da capacidade de suporte de um solo que pode ser utilizada no dimensionamento de pavimentos flexíveis. O ensaio determina a força necessária para que um pistão normalizado penetre no solo imerso até uma certa profundidade com determinada velocidade. O CBR é a força requerida para o pistão penetrar até essa profundidade, expressa em percentagem da força necessária para o mesmo pistão penetrar, até à mesma profundidade e com a mesma velocidade, num provete normalizado. Geralmente, usam-se as penetrações de 2,5 mm e 5,0 mm.

Sintetizando, as principais etapas para a realização do ensaio CBR são:

- Compactação;
- Moldagem de 3 provetes (3 energias diferentes de compactação). Em solos coerentes, moldam-se os provetes com energias de compactação de 12, 25 e 55 pancadas por camada e com os respectivos teores óptimos em água;
- Embebição (4 dias imersos);
- Penetração dos provetes.

Os resultados são comparados com os obtidos na penetração dum material de referência (macadame hidráulico com brita 4-6,8).

Então, o valor do CBR depende:

- da baridade, que por sua vez está relacionada com a granulometria, a forma e a compacidade das partículas;
- do teor em água na compactação;
- do teor em água na altura em que se efectua a penetração.

No Anexo A.1.3, encontram-se os resultados do ensaio CBR. Normalmente, o traçado da curva força - penetração apresenta convexidade voltada para cima, mas, por vezes, é necessário fazer uma correcção quando o troço inicial apresenta uma forma côncava. Para isso, traça-se uma tangente à curva no ponto de inflexão, sendo o ponto de intersecção com o eixo das penetrações a nova origem.

Os resultados do Ensaio CBR foram os seguintes:

*Molde nº13 :*     .  $\gamma_d$  (saturado) = 1,822 g/cm<sup>3</sup>  
                         . Penetração de 2,5 mm: 245 Kgf  
                         . Penetração de 5 mm: 410 Kgf

*Molde nº35 :*     .  $\gamma_d$  (saturado) = 1,923 g/cm<sup>3</sup>  
                         . Penetração de 2,5 mm: 260 Kgf  
                         . Penetração de 5 mm: 550 Kgf

O CBR, expresso em percentagem, é determinado pela expressão:

$$CBR = 100 \cdot \frac{x}{y} \quad (2)$$

CBR [%] – Valor do CBR;

X [Kgf] – Força correspondente a uma penetração no provete de solo;

Y [Kgf] – Força correspondente à mesma penetração num provete padrão.

Os valores normalizados para a curva força – penetração do provete padrão são de 1355 Kgf para uma penetração de 2,5 mm e 2033 Kgf para uma penetração de 5,0 mm, [7].

$$\text{Molde nº13:} \quad CBR = 100 \cdot \frac{x}{y} = 100 \cdot \frac{245}{1355} = 18,1 \% , (2,5 \text{ mm})$$

$$CBR = 100 \cdot \frac{x}{y} = 100 \cdot \frac{410}{2033} = 20,2 \% , (5,0 \text{ mm})$$

$$\text{Molde nº35: } \text{CBR} = 100 \cdot \frac{x}{y} = 100 \cdot \frac{260}{1355} = 19,2 \% , (2,5 \text{ mm})$$

$$\text{CBR} = 100 \cdot \frac{x}{y} = 100 \cdot \frac{550}{2033} = 27,1\% , (5,0 \text{ mm})$$

Normalmente, o CBR do solo é o valor correspondente à penetração de 2,5 mm. Como o valor do CBR correspondente à penetração de 5 mm é superior à de 2,5 mm, dever-se-ia ter repetido o ensaio e, só caso se confirmasse o mesmo valor, se adoptaria o valor correspondente à penetração de 5 mm. Contudo, o valor considerado para o cálculo do CBR foi o correspondente à penetração de 2,5 mm, pois o ensaio foi realizado apenas uma vez.

O valor do CBR final é o correspondente a 95% do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm}$ ), dado pelo ensaio de PROCTOR (ver Anexo A.1.4). Este ensaio dinâmico permite a determinação experimental da curva de compactação (peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) em função do teor de humidade ( $w$ )). No ponto correspondente ao vértice da curva determina-se o teor em água óptimo ( $W_{opt}$ ) para o qual, se um solo for compactado com a energia do ensaio, o peso específico aparente seco é máximo. No ramo ascendente, a água lubrifica as partículas e facilita o arranjo destas, ocorrendo o acréscimo do peso específico. Já no ramo descendente, a água amortiza a compactação, tendo como consequência o decréscimo do peso específico.

Resultado do Ensaio de PROCTOR:

$$\gamma_{dm\acute{a}x} = 1,985 \text{ g/cm}^3$$

Traçando o gráfico  $\gamma_d = f(\text{CBR})$  para cada um dos moldes:

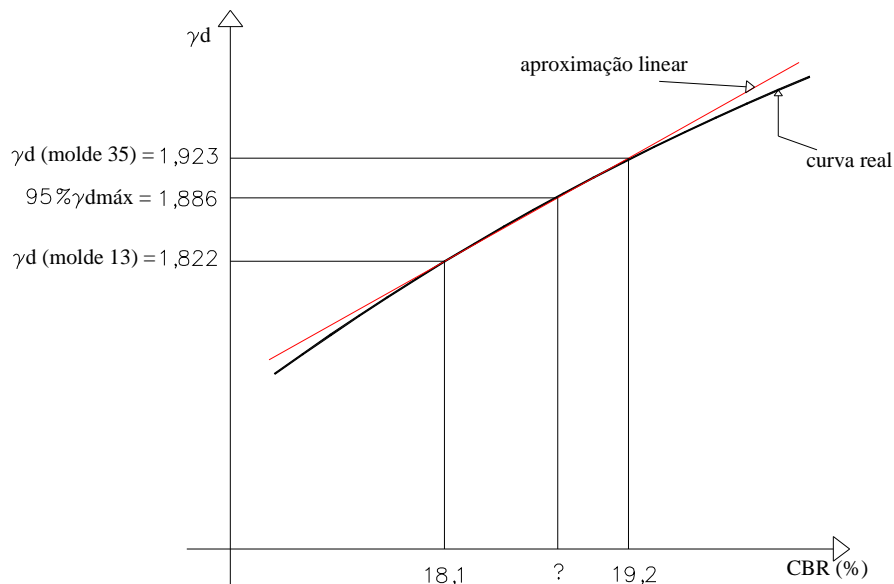


Fig. 1- Gráfico do peso específico em função do CBR.

Fazendo uma aproximação linear entre os dois pontos chega-se à seguinte equação:

$$\gamma_d = 0,0918 \cdot \text{CBR} + 0,16$$

$$\gamma_d = 1,886 : \text{CBR} \cong 19 \%$$

Por vezes, estima-se o módulo de deformabilidade do solo de fundação através da relação empírica:

$$E_s(\text{Mpa}) = 10 \cdot \text{CBR}(\%) \quad (3)$$

Porém, esta equação linear apenas é válida para o intervalo de CBR entre 8% e 15%, e mesmo isto é discutível, [1]. Como o CBR do solo em estudo é de 19%, achou-se adequado o uso da correlação estipulada no Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários, o que conduz a um valor de 174 MPa.

O coeficiente de Poisson não tem uma influência significativa no resultado dos cálculos estruturais, pelo que é comum utilizar os seguintes valores, consoante o CBR, [1]:

$$\text{CBR} < 15\% \quad - \nu = 0,45;$$

$$\text{CBR} > 15\% \quad - \nu = 0,40.$$

Finalmente, está-se em condições de caracterizar o material de acordo com os seus parâmetros elásticos:

Solo de Fundação:  $E = 174 \text{ Mpa}$

$$\nu = 0,40 \quad (\text{CBR} > 15\%)$$

## 5.2. CAMADAS BETUMINOSAS

### 5.2.1. GENERALIDADES

Uma mistura betuminosa é caracterizada pelas características dos inertes e do ligante utilizado. No caso de uma mistura betuminosa a quente é utilizado como ligante o betume, material visco – elástico que permite a ligação dos diversos componentes granulares. As misturas por ele constituídas dependem não só do valor das cargas que suportam, mas também da temperatura e dos tempos de aplicação das cargas. Devido ao seu comportamento visco – elástico, o tempo de actuação de carga é um factor muito influente na determinação do módulo de rigidez das misturas betuminosas. Um tempo elevado de carga, no caso de zonas de velocidades baixas ou de perdas de prioridade, reduz o módulo de rigidez da mistura, prejudicando o seu período de vida útil. Na verdade, as extensões da mistura têm uma componente elástica instantânea e proporcional à tensão aplicada. Já na componente viscosa o crescimento deixa de ser proporcional com o aumento de actuação de carga e com a temperatura.

Para efeitos de dimensionamento de um pavimento, considerando apenas as misturas betuminosas, é utilizado o critério de ruína para a fadiga. Entende-se por fadiga a actuação repetida das cargas que provoca a redução da resistência dos materiais. O efeito da resistência à tracção por fadiga considera-se no fim das camadas betuminosas, local onde surge o início da fissuração que acaba por se propagar através do pavimento aparecendo à superfície. As leis empíricas de comportamento à fadiga recomendadas pela Shell – [1] - permitem que se verifique se um determinado número de repetições da carga padrão ultrapassa ou não as tensões de tracção nas camadas betuminosas provocadas pela deformação geral do pavimento quando submetido às cargas verticais. Esta metodologia tem vindo a ser correntemente utilizada para os pavimentos flexíveis.

### 5.2.2. TEMPERATURA

A temperatura tem grande influência na rigidez das camadas betuminosas, sendo indispensável a sua consideração em cálculos estruturais. A temperatura média anual do ar para o distrito do Porto é de 15,4 °C, [1].

Seguindo a metodologia proposta pela Shell, as temperaturas de cálculo para as camadas betuminosas deverão ser, [1]:

- Betão Betuminoso – 23 °C;
- Macadame Betuminoso – 22 °C.

### 5.2.3. FREQUÊNCIA

A tensão introduzida por um pneu num certo ponto gera tensões de tracção horizontais na base das camadas betuminosas. Nas proximidades desse ponto a tensão começará por crescer até atingir um pico correspondente à passagem da roda. Inevitavelmente, depois da passagem pelo ponto, a tensão decresce até que uma nova tensão introduzida por uma outra roda provoque o seu crescimento. Designando-se por  $a$  a extensão temporal desse pico, e de modo a criar um modelo matemático que analise as tensões de tracção horizontais geradas pelas sucessivas passagens de uma roda, chega-se a um gráfico muito semelhante a uma curva sinusoidal.

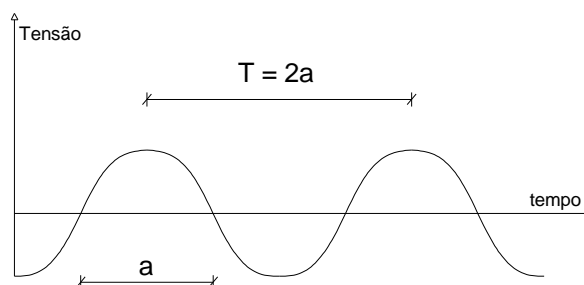


Fig. 2- Tensão introduzida por um pneu.

A extensão temporal ( $a$ ) depende da velocidade e das dimensões da área de contacto entre o pneu e o pavimento. A onda representativa da tensão horizontal em função do tempo num dado ponto tem um período de  $T=2.a$ , como se pode observar na Fig. 2. Contudo, o carácter visco – elástico do betume leva a um atraso das deformações correspondentes às tensões instaladas, isto é, o pico de tensão máxima não corresponde necessariamente ao ponto de extensão máxima. Esta é atingida quando a tensão já está em fase decrescente, [1]. O cálculo do módulo de deformabilidade para materiais visco – elásticos torna-se, assim, de grande complexidade, usando-se nos cálculos de verificação estrutural de pavimentos um módulo pseudo – elástico que varia consoante a frequência e temperatura. O método da Shell defende que para se determinar a frequência de cálculo em função da velocidade dos veículos se deva considerar um período de  $20/3$  do tempo de aplicação de carga, [1]:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{3}{20T} \quad (4)$$

$f$  [Hz] – Frequência;

$T$  [s] – Período.

O período é dado por:

$$T = \frac{2 \cdot r}{v} \quad (5)$$

$T$  [s] – Período;

$r$  [m] – Raio do círculo de área equivalente à área de contacto efectiva. Geralmente, considera-se 12,5 cm;

$v$  [m/s] – Velocidade do veículo.

Simplificando, chega-se à seguinte fórmula da frequência em função da velocidade:

$$f = \frac{1}{6} \cdot v \quad (6)$$

$f$  [Hz] – Frequência;

$v$  [Km/h] – Velocidade do veículo;

Existem outras expressões para o cálculo da frequência, como a expressão de Klomp ( $f=0,4.V$ ). No entanto, adoptou-se o método da Shell, pois é um valor mais conservativo e está pelo lado da segurança.

Devido às características de curvatura em planta e inclinações em perfil, a velocidade dos veículos considerada para efeitos de dimensionamento foi de 30 Km/h. Substituindo na fórmula anterior chega-se a uma frequência de 5 Hz, [1].

#### 5.2.4. CONSTITUINTES E PARÂMETROS RESISTENTES DAS MISTURAS BETUMINOSAS

Tendo por base o Manual ara Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários, achou-se adequada a escolha da seguinte estrutura para as misturas betuminosas:

Camada 1: Betão betuminoso em camada de desgaste;

Camada 2: Macadame betuminoso em camada de base.

Devido ao tráfego reduzido (TMDP = 264 veículos), não se considerou camada de ligação. Além disso, como o macadame é mais económico torna-se vulgarmente utilizado para espessuras elevadas.

A espessura recomendável para o betão betuminoso em camada de desgaste deverá ser compreendida entre 4 a 6cm e para o macadame betuminoso, em camada de base, deverá estar entre 8 a 15 cm, [3]. A solução adoptada numa primeira tentativa para as camadas betuminosas foi a seguinte:

Betão betuminoso em camada de desgaste: 6 cm

Macadame betuminoso em camada de base: 11 cm

A classe de betume a empregar deverá ser o 35/50 para o macadame betuminoso em camada de base, enquanto que para o betão betuminoso em camada de desgaste deverá ser usado um ligante modificado, [4]. O uso de betumes modificados (betume + aditivos) proporciona as seguintes características:

- Um aumento de flexibilidade e resistência ao envelhecimento;
- Menor susceptibilidade térmica no comportamento estrutural;
- Diminuição de ruído;
- Melhor adesividade aos agregados;
- Melhor colagem entre camadas;
- Redução da frequência da manutenção.

Como aditivos, utilizam-se o enxofre, borrachas, elastómeros endurecidos, compostos orgânicos de manganês, entre outros. O Caderno de Encargos – Tipo recomenda o uso de misturas termoplásticas do tipo estireno – butireno – estireno (SBS). Este ligante modificado permite uma maior margem de segurança muitas vezes indispensável face aos veículos com cargas por eixo ilegais e, principalmente, uma maior resistência e flexibilidade face a acções tangenciais e variações de temperatura.

Os agregados para as misturas betuminosas deverão ser resistentes sob a acção dos agentes climatéricos, ter uma qualidade homogénea e uma adequada adesividade ao ligante. Estes, não devem conter substâncias prejudiciais aos parâmetros que conferem resistência à mistura e deverão ser fabricados a partir das características fixadas no respectivo Caderno de Encargos.

#### 5.2.4.1. Constituição do betão betuminoso com ligante modificado

Fracções granulométricas: 0/4, 4/10, 10/14 ( $D_{\text{máx}}$ : 14 mm);

A mistura de agregados deverá respeitar todas as imposições do C.E., no que diz respeito às características de:

- Fuso granulométrico;
- Perda por desgaste na máquina de Los Angeles (Granulometria B), máxima (20%  $\pm$  10%);
- Percentagem de material britado (100%);
- Índices de lamelação e de alongamento, máximos (25%);
- Coeficiente de polimento acelerado, mínimo (0,50);
- Equivalente de areia da mistura de agregados (sem a adição de filer), mínimo (60%);
- Valor de azul metileno (material de dimensão inferior a 75  $\mu\text{m}$ ), máximo (0,8);
- Absorção de água para cada uma das fracções granulométricas componentes, máxima (2%).

Quanto às características da mistura betuminosa, tendo por base o método de Marshall, deverão ser respeitadas as condicionantes referentes a:

- Número de pancadas em cada extremo do provete (75);
- Força de rotura (8000 a 15000);
- Deformação máxima (4mm);
- Valor de VMA (Percentagem de vazios na mistura de agregado), mínimo (14%);
- Porosidade (4 - 6%);
- Relação ponderal filer (material de dimensão inferior a 75  $\mu\text{m}$ )/ betume (1,1-1,5);
- Resistência conservada, mínima (75%);
- Percentagem de betume (5,2% a 5,8%).

#### 5.2.4.2. Constituição do macadame betuminoso com características de base

Fracções granulométricas: 0/4, 4/20, 20/40 ( $D_{\text{máx}}$ : 40 mm) – Fuso B para espessuras  $\geq$  10 cm;

A mistura de agregados deverá respeitar todas as imposições do C.E., no que diz respeito às características de:

- Fuso granulométrico;
- Perda por desgaste na máquina de Los Angeles (Granulometria A), máxima (40%);
- Índices de lamelação e de alongamento, máximos (30%);
- Equivalente de areia da mistura de agregados, mínimo (50%);
- Valor de azul metileno (material de dimensão inferior a 75  $\mu\text{m}$ ), máximo (0,8);
- Absorção de água para cada uma das fracções granulométricas componentes, máxima (3%).

Em relação à mistura betuminosa, em virtude da percentagem acumulada do material que passa no peneiro de 25 mm ASTM ser inferior a 100%, o método de Marshall não é aplicável, devendo ser respeitadas as condicionantes referentes a:

- Percentagem de betume (relação ponderal entre a massa do betume e a massa total da mistura), mínima (4,3%  $\pm$  0,3%);
- Relação ponderal filer (material de dimensão inferior a 75  $\mu\text{m}$ )/betume (1,1-1,5);



- Porosidade em obra após construção (4%-8%);
- A mistura deverá apresentar em obra trabalhabilidade suficiente para a obtenção das baridades especificadas no C.E.

#### 5.2.4.3. Parâmetros resistentes das misturas betuminosas

O coeficiente de Poisson deverá ser de 0,35 para as duas camadas, já que se toma este valor sempre que a penetração nominal do betume seja igual ou inferior a 40/50. Para prever os módulos de rigidez, são necessários os seguintes elementos, [1]:

- Temperatura média anual do ar para o distrito do Porto: 15,4 °C (Gr.T1);
- Frequência de cálculo: 5Hz;
- Classe de betume: 35/50\*;
- Peso volúmico do betume: 1,03 g/cm<sup>3</sup>.

As folhas de cálculo para os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas apresentadas no Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários prevêm as características da mistura e do ligante dentro das tolerâncias fixadas no Caderno de Encargos - Tipo das Estradas de Portugal. Contudo, deve-se fazer uma reconfirmação dos valores referentes às características expectáveis para cada mistura no que diz respeito a:

- P<sub>200</sub> – Percentagem de passados no peneiro nº 200 ASTM;
- P<sub>bet</sub> – Percentagem de betume;
- Por. – Porosidade da mistura betuminosa (em obra);
- Bar. – Baridade correspondente (em obra).

Quadro 5 – Reconfirmação dos valores referentes a cada mistura betuminosa.

	Betão Betuminoso		Macadame Betuminoso	
	C.E.	MDPR	C.E.	MDPR
P <sub>200</sub> (%)	5-9	6,6	2 – 8	4,5
P <sub>betume</sub> (%)	5,2 – 5,8	5,4	> 4,3	4,5
Porosidade (%)	4 – 6	4,4	4 – 8	8
Baridade (g/cm <sup>3</sup> )	-	2,34	-	2,24

\* 35/50 ≈ 40/50 (valor dado pelo MDPR). O módulo de rigidez da classe 40/50 tem um valor inferior ao 35/50, pelo que ao adoptar-se o 35/50 está-se do lado da segurança.

Desenvolvidos os passos anteriores, está-se em condições de determinar os módulos de deformabilidade para cada mistura. Porém, através da experiência, sabe-se que todo o processo de cálculo segundo o Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários leva a valores exagerados dos módulos de deformabilidade, pelo que uma diminuição de cerca de 10 % dos módulos nele apresentados aproxima mais os resultados da realidade. Assim, tem-se:

- Betão betuminoso em camada de desgaste:  $E=5600 \text{ MPa}$ ;  $\nu=0,35$ ;
- Macadame betuminoso em camada de base:  $E= 4800 \text{ MPa}$ ;  $\nu=0,35$ .

Estes valores já têm alguma margem de segurança, caso se verifiquem alterações nas características dos materiais, quando colocados em obra.

### 5.3. CAMADAS GRANULARES

#### 5.3.1. GENERALIDADES

A camada de solo de fundação é extremamente condicionante para as características dos materiais granulares. Um problema que se põe no cálculo do módulo de deformabilidade é a sua variação consoante a espessura das camadas granulares. Na base, tem um valor semelhante ao da superfície do solo de fundação, aumentando progressivamente com a diminuição da profundidade. Adota-se, por isso, um valor médio aparente para o seu módulo de deformabilidade que, além de depender da camada subjacente, depende ainda do tipo e espessura das camadas suprajacentes (a permeabilidade das camadas betuminosas é 3 a 4 vezes inferior à das camadas granulares). De um modo geral, todo o estado tensorial instalado influencia o módulo de deformabilidade das camadas granulares. Mais uma vez, o método que na prática corrente se utiliza é o da Shell, [1]. Trata-se de um método simplificado que prevê o módulo de deformabilidade das camadas granulares, considerando as características da camada subjacente e a espessura da respectiva camada granular, [1]:

$$E_{gr} = K.E_{inf} \quad \text{com} \quad 2 < K = 0,2.h^{0,45} < 4 \quad (7)$$

$E_{gr}$  [MPa] – Módulo de Deformabilidade da camada granular;

$E_{inf}$  [MPa] – Módulo de Deformabilidade da camada inferior;

$h$  [mm] – Espessura da camada granular (mm).

Os módulos calculados pelo método da Shell são de uma maneira geral muito superiores aos valores observados “in situ” (os teores de humidade nas camadas granulares são muito afectados pela permeabilidade das camadas betuminosas que as recobrem). Quanto maior for a espessura das camadas betuminosas, maior será o desfasamento entre o módulo calculado pela Shell e o módulo real. Esta situação é particularmente importante quando as camadas de betume têm grande expressão, devendo-se utilizar a expressão da Shell afectada de coeficientes de minoração calculados através de

dados experimentais. Deste modo, evita-se que os pavimentos fiquem subdimensionados, já que o optimismo da fórmula da Shell atribui às camadas granulares módulos de deformabilidade superiores àqueles que se observam “in situ”, não esquecendo também que estes diminuem com o tempo de exploração, devido à descompressão das camadas granulares.

### 5.3.2. CONSTITUIÇÃO DA CAMADA GRANULAR

A espessura recomendável para a base granular deverá ser de 20 cm - [3] -, realizada em material de granulometria extensa com agregados isentos de argilas ou outros produtos prejudiciais à formação homogénea de características. As fracções granulométricas a respeitar são, [4]:

- Fracções granulométricas: 0/4, 4/20, 20/40 ( $D_{máx} = 40\text{mm}$ )

Os materiais para camadas granulares com características de base em agregado britado de granulometria extensa deverão respeitar também as seguintes especificações do C.E., no que diz respeito às características de:

- Fuso granulométrico;
- Perda por desgaste na máquina de Los Angeles (Granulometria A), máxima (40%);
- Índices de lamelação e de alongamento, máximos (35%);
- Limite de liquidez (NP)\*;
- Índice de plasticidade (NP)\*;
- Equivalente de areia mínimo (50%);
- Se  $E.A. < 50\%$ , o valor de azul de metileno corrigido ( $V_{Ac}$ ) deverá ser inferior a 30 %:

$$V_{Ac} = V_A \cdot \frac{\% \#200}{\% \#10} \cdot 100 \quad (8)$$

$V_A$  – Valor de azul metileno obtido pelo método da mancha no material de dimensão inferior a 75  $\mu\text{m}$ .

### 5.3.3. PARÂMETROS RESISTENTES DA CAMADA GRANULAR

Recorrendo-se à fórmula (7):

$$E_{gr} = K \cdot E_{inf}, \quad \text{com } 2 < K = 0,2 \cdot h^{0,45} < 4$$

$h = 200 \text{ mm}$ ;

$$K = 0,2 \cdot 200^{0,45} = 2,17.$$

$E_{fundação} = 174 \text{ MPa}$ ;  $E_{granular} \cong 378 \text{ MPa}$ .

---

\* É dispensada se o material que passa no # 200 < 5%

Como foi mencionado anteriormente, os módulos calculados pelo método da Shell são demasiado optimistas em relação aos que se observam “in situ”. Assim, para que os módulos de deformabilidade se aproximem mais da realidade, utilizar-se-ão coeficientes de minoração calculados através de dados experimentais, tendo por base a expressão da Shell. Neste caso, a espessura das camadas betuminosas influencia o cálculo do módulo de deformabilidade da camada granular. Para isso, seguiu-se o processo no Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários.

Elementos a utilizar:

- Espessura das camadas consideradas:  $6+11 = 17 \text{ cm}$  ( $10\text{cm} < e < 20\text{cm}$ );
- Espessura da camada granular considerada: 20 cm.

Coeficiente de minoração correspondente: 1,4 (o coeficiente de minoração deve ser multiplicado directamente pelo módulo da fundação).

Módulo de Deformabilidade:  $E_{\text{granular}} = 1,4 \cdot 174 \cong \mathbf{240 \text{ MPa}}$

Este valor já se aproxima mais da realidade, pelo que será o adoptado no processo de cálculo para o dimensionamento do pavimento.

Para as camadas granulares, o coeficiente de Poisson a adoptar deverá ter o valor de 0,35, [1].

# 6

## PERFIL TRANSVERSAL TIPO

Considerando as condições expressas nos subcapítulos anteriores, definiu-se o perfil transversal tipo com as seguintes características para cada camada:

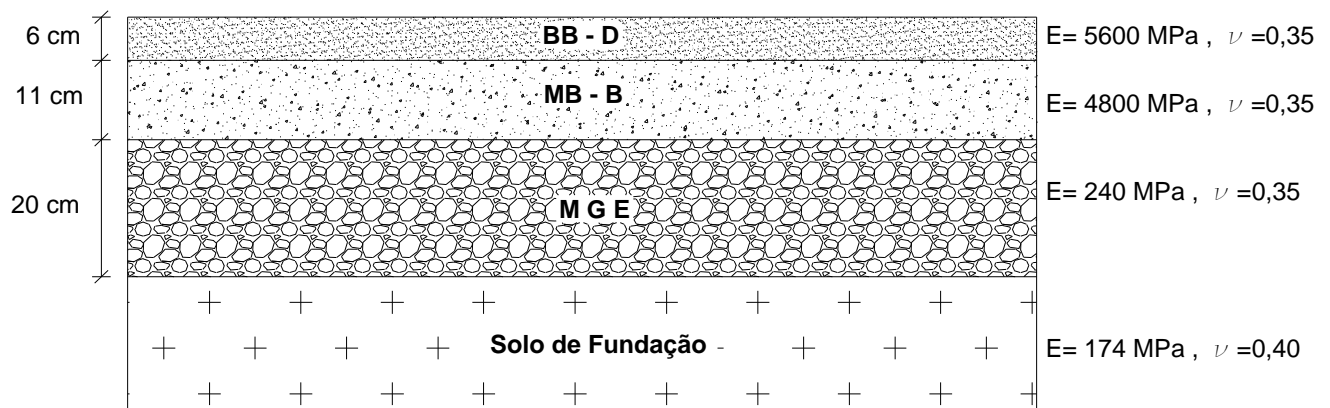


Fig. 3 – Perfil transversal tipo do pavimento.

### 6.1. CAMADA DE DESGASTE EM BETÃO BETUMINOSO COM LIGANTE MODIFICADO (BB-D)

Principais características do ligante, mistura de agregados e da mistura betuminosa, respeitando as imposições do C.E.:

- Betume modificado com a incorporação de polímeros do tipo estireno – butireno – estireno (SBS);
- Percentagem de polímero incorporado no betume: 6% a 8%;
- Penetração a 25 °C, 100g, 5s (0,1 mm): 70/110\*;

\* No MDPR utiliza-se o 40/50, mas os valores do manual são meramente indicativos e estão pelo lado da segurança. Optando-se pela classe de betume 70/110 e, juntamente com os aditivos do betume modificado, chega-se facilmente ao módulo considerado.

- Peso volúmico do betume: 1,03 g/cm<sup>3</sup>;
- Porosidade em obra: 4,4%;
- Percentagem de betume: 5,4%;
- Dimensões nominais do agregado: 0/14;
- Percentagem acumulada do material passado no peneiro nº 200 ASTM: 6,6%.

## **6.2. MACADAME BETUMINOSO EM CAMADA DE BASE (MB-B)**

Principais características do ligante, mistura de agregados e da mistura betuminosa, respeitando as imposições do C.E.:

- Classe de Betume: 35/50;
- Peso volúmico do betume: 1,03 g/cm<sup>3</sup>;
- Porosidade em obra: 8,0%;
- Percentagem de Betume: 4,5%;
- Dimensões nominais do agregado: 0/40;
- Percentagem acumulada do material passado no peneiro nº200 ASTM: 4,5%.

## **6.3. BASE EM AGREGADO BRITADO DE GRANULOMETRIA EXTENSA (MGE)**

Principais características da base granular, respeitando as condições expressas no C.E.:

- Material de granulometria extensa;
- Dimensões nominais: 0/40;
- Equivalente de areia mínimo: 50%;
- Perda por desgaste na máquina de Los Angeles, máxima: 40%.

# 7

## REGAS BETUMINOSAS DE IMPREGNAÇÃO E COLAGEM

### 7.1. REGA DE IMPREGNAÇÃO BETUMINOSA

Segundo as especificações do Caderno de Encargos - Tipo, deve ser realizada uma impregnação da base de granulometria extensa que suporte directamente camadas betuminosas. A impregnação da base granular protege a camada da penetração do betume e de outras substâncias que prejudiquem as suas características resistentes. Para se proceder à impregnação da camada granular é importante dispor de materiais betuminosos menos viscosos à temperatura ambiente e que se mantenham com essas características o tempo necessário para a execução do trabalho. Para isso, procede-se à liquefacção do betume, através de solventes apropriados, obtendo-se os betumes fluidificados (cut – back). Existem vários tipos – o SC (“slow curing”), o MC (“medium curing”) e o RC (“rapid curing”). No entanto, devido a factores de ordem técnica, económica, de facilidade de operação e também ambientais, os betumes fluidificados têm vindo a cair em desuso, sendo progressivamente substituídos pelas emulsões betuminosas.

Uma emulsão betuminosa não é mais que uma dispersão de betume em água com a ajuda de agentes emulsionantes. A mistura do betume com a água tem como finalidade facilitar a sua aplicação, visto que é feita à temperatura ambiente, sem qualquer tipo de aquecimento. Dependendo do objectivo que se pretenda para a aplicação da emulsão, escolhe-se a mais apropriada, tendo em conta a forma de rotura. A rotura ocorre quando a emulsão se mistura com os agregados, provocando a separação do betume e da água que, posteriormente, é evaporada. Sendo assim, existem emulsões de rotura lenta, SS (“slow setting”); de rotura média, MS (“medium setting”) e de rotura rápida, RS (“rapid setting”). No caso das regas de impregnação, as emulsões lentas serão as mais adequadas, pois é importante que elas penetrem e funcionem como agentes de impregnação. O tempo de espera até ser atingida a rotura deverá ser cumprido para que não se corra o risco de ficarem agentes fluidificantes entre camadas do pavimento, que levam à sua degradação. A emulsão mais adequada para este caso é, segundo a nomenclatura do LNEC, a ECL-1 ou EAL-1, conforme se tratem de inertes com carga negativa ou carga positiva, respectivamente. Estas emulsões encontram-se nas especificações E354-1984 (emulsões betuminosas catiónicas) e E128-1984 (emulsões betuminosas aniónicas).

Antes de se proceder à impregnação da base de granulometria extensa é necessário fazer uma limpeza da superfície da camada, para que esta não apresente material solto, detritos e poeiras que prejudiquem a impregnação. De seguida, a superfície deve ser humidificada de modo a facilitar a penetração do aglutinante na camada. O valor da taxa de espalhamento deverá ser ajustado experimentalmente, podendo ser tomado o valor de 1 Kg/m<sup>2</sup>. As temperaturas ambiente e do pavimento no momento de

aplicação do aglutinante devem ser maiores que 5°C. As restantes características são expressas no respectivo C.E.

## **7.2. REGA DE COLAGEM**

Para a rega de colagem entre uma camada betuminosa com betume modificado e uma outra camada betuminosa, deve-se aplicar obrigatoriamente uma emulsão betuminosa modificada com incorporação de polímeros adequados, de forma a conferir uma grande adesividade, [4]. A emulsão betuminosa deve ser do tipo catiónico de rotura rápida, isto é, com tempos de espera baixos. Dever-se-ão, ainda, respeitar as seguintes imposições do C.E. ao nível de:

- Viscosidade Saybolt – Furol, a 50 °C, mínima (20s);
- Teor em betume, mínimo (66%);
- Teor em água máximo (34%);
- Peneiração, máxima (0,1%);
- Sedimentação, aos 7 dias, máxima (5%);
- Penetração do resíduo de destilação, a 25°C, 100g, 5s (0,1mm); (100-200).

A colocação das camadas betuminosas só pode ser efectuada quando a camada de granulometria extensa tiver o grau de compactação e regularidade expressas no C.E. e, evidentemente, tenha terminado a cura da impregnação betuminosa. No caso da ligação entre camadas betuminosas ter-se-á, mais uma vez, que se proceder a uma limpeza inicial para que a superfície não apresente detritos prejudiciais. Geralmente, antes da rega de colagem, utilizam-se jactos de ar comprimido para remover os elementos finos presentes na superfície. A taxa de rega deverá ser ajustado conforme as condições do local, mas não deve exceder os 0,5 Kg/m<sup>2</sup>.



# 8

## VERIFICAÇÕES ESTRUTURAIS

Depois de se definirem as características dos materiais, procede-se à verificação do funcionamento estrutural do pavimento. Como foi mencionado nos capítulos anteriores, a acção dos veículos sobre o pavimento provoca estados de tensão que estão na origem das deformações dos materiais. A análise do estado de tensão e deformação, para um veículo isolado, é feita através do modelo multi-camadas de Burmister, que considera uma carga estática de 130 KN sobre materiais homogéneos, isotrópicos e elásticos, tendo em conta se as camadas são ligadas ou não. Este modelo procura representar de uma forma realística as possíveis interações entre todos os parâmetros que caracterizam a estrutura. Ao analisar o estado de tensão e extensão num pavimento não se deve considerar o estado de tensão de uma forma isolada, mas sim como uma repetição de um mesmo estado. Desta forma, a actuação repetida das cargas, designado por fadiga, é um dos critérios de ruína utilizado para o dimensionamento de um pavimento rodoviário. Para controlar a fadiga dos materiais é muito importante saber o local onde ocorre a primeira fissuração, isto é, onde a extensão é máxima. Isto acontece no fim das camadas betuminosas, visto que, ao serem ligadas, as extensões por tracção passam das camadas suprajacentes para as subjacentes, aumentando o risco de fissuração com a profundidade.

Os materiais betuminosos, apesar de terem um comportamento semelhante ao elástico, não têm características elásticas. Este comportamento visco-elástico origina deformações irreversíveis que, com o seu acumular, poderão levar a uma deformação excessiva do pavimento. Por outras palavras, a deformação permanente à superfície do pavimento é originada pela soma das deformações ocorridas em todas as camadas. Deve-se, então, limitar a deformação vertical de compressão no topo do solo de fundação. Com isto, surge um outro critério de ruína utilizado no dimensionamento de um pavimento, no que se refere ao controlo da deformação permanente no início do solo de fundação.

A partir das leis empíricas desenvolvidas pela Shell relaciona-se a extensão máxima admissível para um número acumulado de passagens previstas do eixo-padrão, no presente caso para um tráfego de  $1,87 \times 10^6$  eixos-padrão. Para o cálculo das extensões resultantes da estrutura previamente seleccionada recorreu-se ao programa de cálculo ALIZÉ, que considera o modelo multi-camadas de Burmister para a análise do estado de tensão/deformação. Por fim, comparam-se as deformações calculadas com as máximas admissíveis para cada um dos critérios de ruína:

- Fadiga por tracção no fim das camadas betuminosas;
- Deformação vertical permanente no início da fundação.

Se por acaso as deformações instaladas são maiores do que as admissíveis, o processo repete-se até se conseguir obter valores inferiores.

### 8.1. FADIGA POR TRACÇÃO

A extensão admissível para o critério de fadiga é dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_t = K \cdot N_{130}^{-0,20} \quad (9)$$

K – Coeficiente que pode tomar os seguintes valores:

$3,2 \cdot 10^{-3} < K < 3,8 \cdot 10^{-3}$  , para betões betuminosos;

$2,6 \cdot 10^{-3} < K < 2,8 \cdot 10^{-3}$  , para macadames betuminosos;

$\varepsilon_t$  [m/m] – Extensão admissível de tracção no fim das camadas betuminosas;

$N_{130}$  – Número equivalente de eixos-padrão de 130 KN.

Caso sejam conhecidas a percentagem volumétrica de betume ( $V_b$ ) e o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa ( $E$ ), o coeficiente K pode ser calculado pela seguinte expressão, [1]:

$$K = 10^3 \cdot (0,856 \cdot V_b + 1,08) \cdot (10^6 \cdot E)^{-0,36} \quad (10)$$

K – Coeficiente multiplicativo;

$V_b$  [%] – Percentagem volumétrica de betume;

$E$  [MPa] – Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa.

Então, calculando a extensão admissível pelo lado da segurança (utilizando o coeficiente K menor para o caso dos macadames betuminosos) tem-se:

$$\varepsilon_t \text{ (admissível)} = 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot (1,87 \cdot 10^6)^{-0,20} = 145 \cdot 10^{-6}$$

No Anexo A.3.1, encontram-se as extensões verificadas para a estrutura escolhida, utilizando o programa de cálculo ALIZÉ:

$$\varepsilon_t \text{ (verificada)} = 139 \cdot 10^{-6} < 145 \cdot 10^{-6} \quad \text{OK!}$$

Para complementar, calcula-se a percentagem de dano causado pela fadiga. O dano deverá ser maior que 80%, caso contrário ficaria sobredimensionado, e ao mesmo tempo, menor que 100%, para que não fique subdimensionado:

$$139 \cdot 10^{-6} = 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot (N)^{-0,20} \leftrightarrow N_{\text{máx}} = 2,29 \cdot 10^6 \text{ eixos-padrão}$$

$$\text{Dano} = \frac{N_{\text{real}}}{N_{\text{máximo}}} = \frac{1,87 \cdot 10^6}{2,29 \cdot 10^6} \cong 82\% \text{ (OK!)}$$

## 8.2. DEFORMAÇÃO PERMANENTE

A extensão admissível para o critério de deformação permanente é dada pela seguinte expressão, [1]:

$$\varepsilon_{dp} = K_s \cdot N_{130}^{-0,25} \quad (11)$$

$\varepsilon_{dp}$  [m/m] – Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação;

$K_s$  – Parâmetro de que depende a probabilidade de sobrevivência:

$K_s = 2,8 \cdot 10^{-2}$ , para 50% de sobrevivência;

$K_s = 2,1 \cdot 10^{-2}$ , para 85% de sobrevivência;

$K_s = 1,8 \cdot 10^{-2}$ , para 95% de sobrevivência.

$N_{130}$  – Número equivalente de eixos-padrão de 130 kN.

Calculando a extensão máxima admissível, adoptando o menor valor para o parâmetro  $K_s$ , pelo lado da segurança, tem-se:

$$\varepsilon_{dp} \text{ (admissível)} = 1,8 \cdot 10^{-2} \cdot (1,87 \cdot 10^6)^{-0,25} = 487 \cdot 10^{-6}$$

No Anexo A.3.1, encontra-se a extensão de deformação permanente verificada para a estrutura escolhida, utilizando o programa de cálculo ALIZÉ:

$$\varepsilon_z \text{ (verificada)} = 338 \cdot 10^{-6} < 487 \cdot 10^{-6} \quad \text{OK!}$$

Cálculo do dano:

$$338 \cdot 10^{-6} = 1,8 \cdot 10^{-2} \cdot (N)^{-0,25} \leftrightarrow N_{\text{máx}} = 8,04 \cdot 10^6 \text{ eixos-padrão}$$

$$\text{Dano} = \frac{N_{\text{real}}}{N_{\text{máximo}}} \cong 23\%$$

O valor de 23 % significa que a estrutura está sobredimensionada no que se refere à deformação permanente. Este valor era previsível devido à elevada qualidade do solo de fundação.

No Quadro 6 apresenta-se, de uma forma simplificada, a verificação para o tráfego correspondente ao pavimento flexível.

Quadro 6 – Verificação das extensões.

	N (x10 <sup>6</sup> )	Extensão de Tracção (× 10 <sup>-6</sup> )		Def. Vertical (× 10 <sup>-6</sup> )	
		Verificado	Admissível	Verificado	Admissível
Pavimento Flexível	1,87	139	145	338	487

Como os valores admissíveis fornecidos pelas fórmulas da Shell são superiores aos verificados, a estrutura flexível está dimensionada.

É de salientar que a potência de  $N$  nas fórmulas recomendadas pela Shell suscita algumas críticas. Isto porque, quanto menor for a potência de  $N$  maior é a dependência entre os materiais e o factor tráfego  $N$ . Ora, o critério de deformação permanente tem uma potência de -0,25 e o critério de fadiga tem uma potência de -0,20, o que leva a concluir que a dependência entre o factor tráfego e o solo de fundação é maior que entre o factor tráfego e as camadas betuminosas. Visto que para as camadas betuminosas são determinadas as suas características de acordo com as solicitações previstas, elas deverão ter uma boa qualidade que possa garantir uma maior dependência com o factor tráfego  $N$  do que um solo de fundação que a priori tem as suas características estabelecidas. Por este motivo, existem algumas leis de fadiga em que o factor tráfego  $N$  está afectado da potência -0,30 (< -0,25).

# 9

## RESUMO

A figura seguinte esquematiza a estrutura seleccionada, testada e verificada:

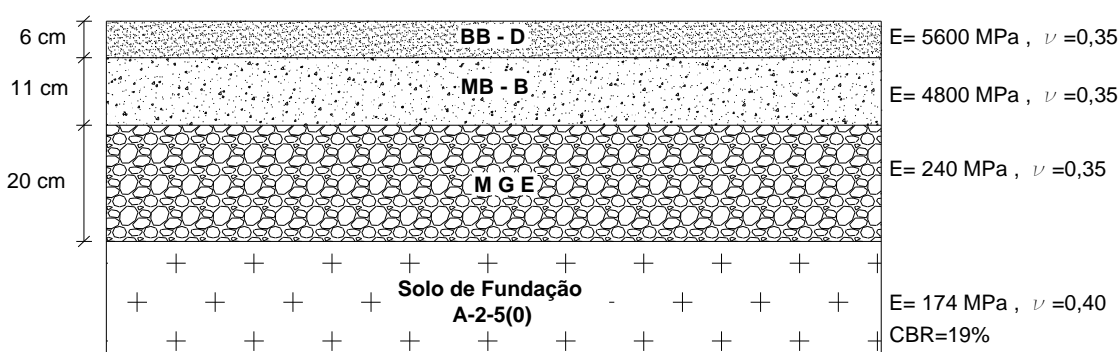


Fig. 4 – Estrutura flexível seleccionada, testada e verificada.

- BB-D: Camada de desgaste em betão betuminoso (0/14) com ligante modificado (70/110);
- MB-B: Macadame betuminoso (0/40) com ligante (35/50) em camada de base;
- MGE: Base em agregado britado de granulometria extensa (0/40).

O solo de fundação será do tipo A-2-5 (0), segundo a Especificação LNEC E 240-1970, sendo constituído por seixo e areia siltosos ou argilosos, sobre o qual se deverá colocar uma camada com 20 cm de Material Granular Britado de Granulometria Extensa (0/40). A superfície granular deverá ser limpa e humidificada para que se proceda a uma rega de impregnação à taxa de 1 Kg/m<sup>2</sup>, utilizando-se uma emulsão lenta do tipo ECL-1 ou EAL-1, conforme se tratem de inertes com carga positiva ou negativa. Após ter terminado a cura da impregnação betuminosa, dever-se-á colocar uma camada de Macadame Betuminoso com a espessura de 11cm. Este macadame do tipo 0/40 deverá ser executado com ligante 35/50. Para a colocação da camada seguinte dever-se-á proceder a uma nova limpeza da superfície, para que se aplique uma rega de colagem à taxa de 0,5 Kg/m<sup>2</sup>, constituída por uma emulsão betuminosa modificada do tipo catiónico de rotura rápida. Por fim, aplicar-se-ão 6 cm de Camada de Desgaste em Betão Betuminoso (0/14) com ligante modificado (70/110), incorporando polímeros do tipo estireno – butireno – estireno (SBS).

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] *Manual de Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários.*
- [2] EAPA. *Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas.*1998.
- [3] *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional.*1995.
- [4] *Caderno de Encargos – Tipo.* E.P.
- [5] *Apontamentos de Pavimentos I.*
- [6] *Apontamentos de Pavimentos II.*
- [7] Especificação LNEC E 198 – 1967.
- [8] Especificação LNEC E 354 – 1984.
- [9] Especificação LNEC E 128 – 1984.
- [10] Especificação LNEC E 240 – 1970.
- [11] Especificação LNEC E 199 – 1967.
- [12] Especificação LNEC E 269 – 1973.
- [13] Especificação LNEC E 197 – 1966.

## **ANEXOS**

### **A.1 – ENSAIOS**

- A.1.1. – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA;
- A.1.2 – LIMITES DE CONSISTÊNCIA DE ATTERBERG;
- A.1.3 – ENSAIO CBR;
- A.1.4 – ENSAIO DE PROCTOR.

### **A.2 – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO**

- A.2.1. – QUADRO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS SEGUNDO A ESPECIFICAÇÃO LNEC E 240-1970.

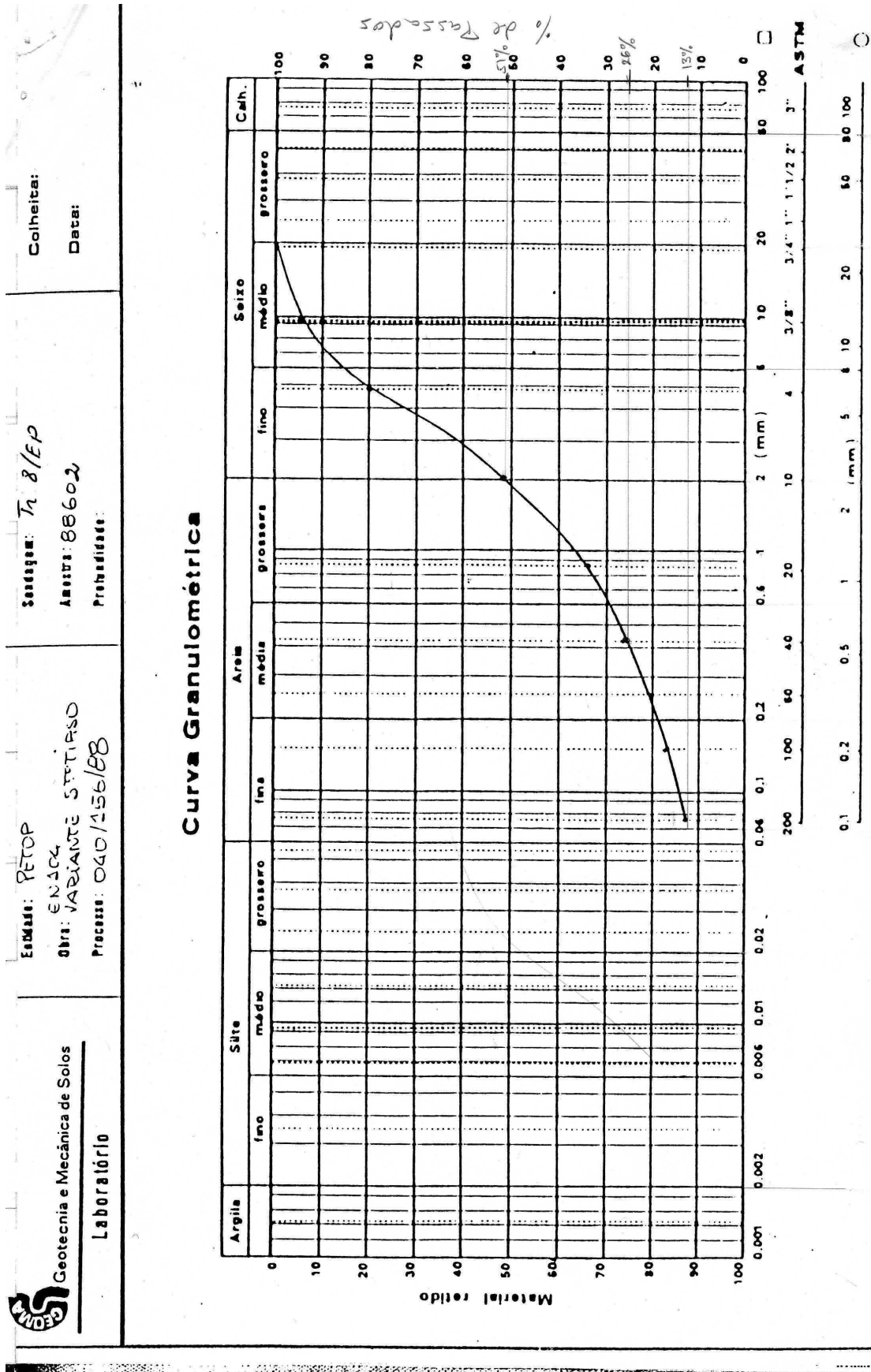
### **A.3 – PROGRAMA DE CÁLCULO ALIZÉ**

- A.3.1. – RESULTADOS DO PROGRAMA DE CÁLCULO ALIZÉ.


## **A.1 - ENSAIOS**



A.1.1. – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA



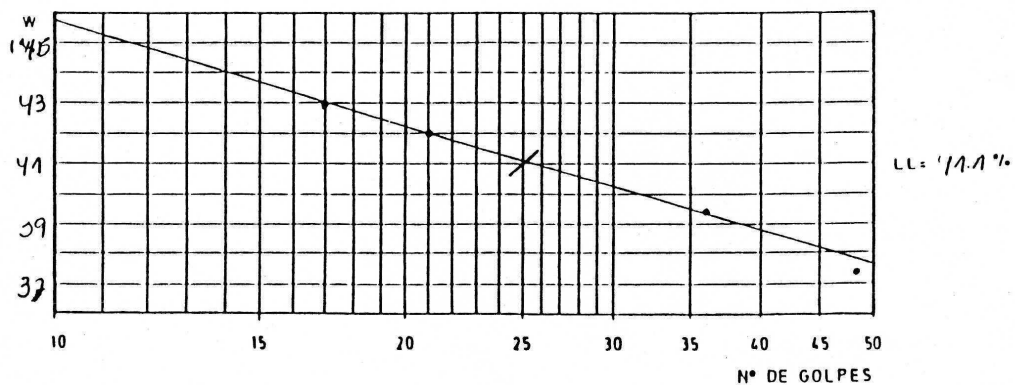
A.1.2 – LIMITES DE CONSISTÊNCIA DE ATTERBERG

 Geotecnia e Mecânica de Solos <b>Laboratório</b>	Entidade: PETOP Obra: EN 304 VARIANTE SUTIRSO Processo: 040/156/88	Sondagem: 728/EP Amostra: 88602 Profundidade:

**LIMITES DE CONSISTÊNCIA  
DE ATTERBERG**

	LIMITE DE LIQUIDEZ				LIMITE DE PLASTICIDADE		
CÁPSULA Nº	320	397	540	503	566	597	
Amostra húmida - cápsula (g)	19.53	23.33	21.54	27.38	16.51	15.98	
Amostra seca - cápsula (g)	16.50	19.13	17.68	21.63	14.63	14.19	
Peso da cápsula (g)	8.38	8.52	8.50	8.19	8.53	8.34	
Peso de água (g)							
Amostra seca (g)							
Teor em água %	37.3	39.6	42.0	42.8	30.8	30.6	
Nº de golpes	48	36	21	17	LP = 30.7 %		

**DIAGRAMA**



**LIMITE DE RETRACÇÃO**

CÁPSULA Nº			Volume da cápsula V (cm³)		
Amostra húmida - cápsula (g)			Peso de mercúrio ① (g)		
Amostra seca - cápsula (g)			Volume do solo seco ① ②	1355	
Peso da cápsula (g)			V - v		
Peso de água		1	A) $V - v / P_s \times 100$		
Amostra seca (P <sub>s</sub> ) (g)			Limite de retracção W-A %		
Teor em água (VI)			Razão de retracção P <sub>s</sub> / v		


LL = 41 %

LP = 31 %

IP = 10

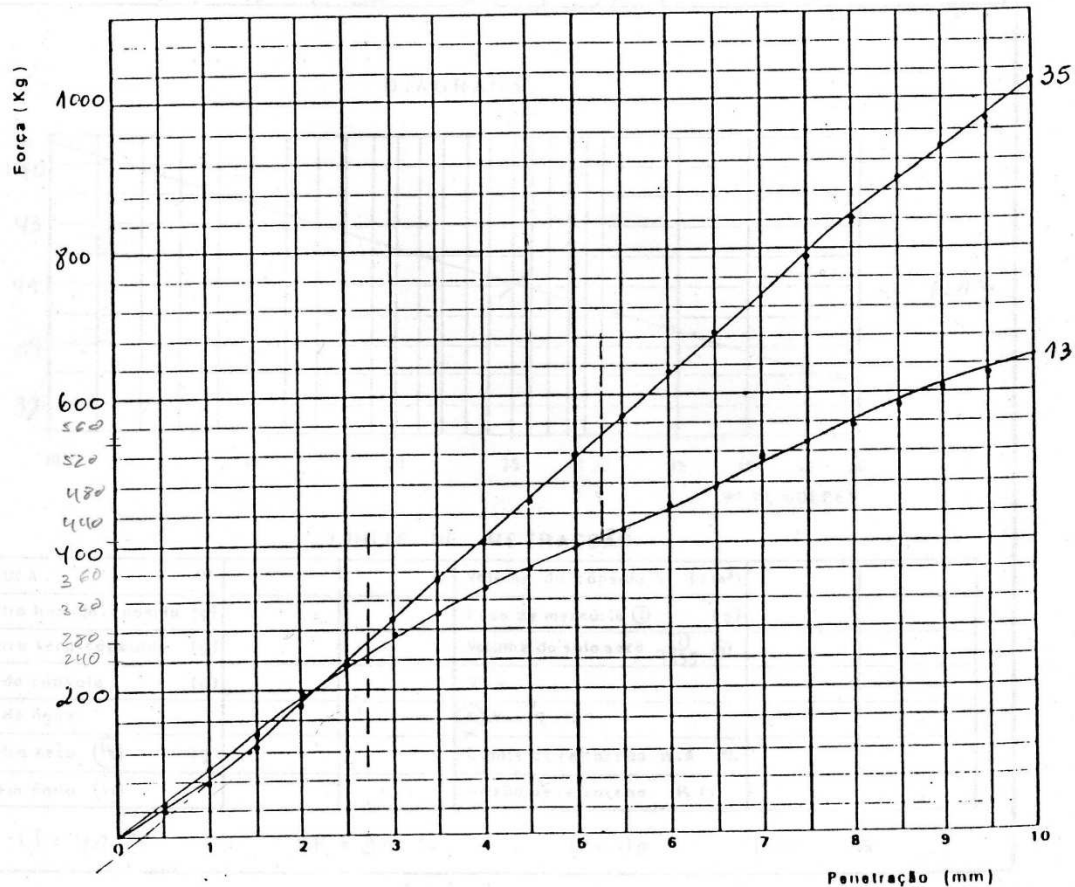
LR = %

A.1.3 – ENSAIO CBR


 <b>Geotecnia e Mecânica de Solos</b> <b>Laboratório</b>	Entidade: <i>PE TUP</i> Obra: <i>EN 104</i> Processo: <i>040/156/88</i>	Sondagem: <i>T2 8/EP</i> Amostra: <i>88602</i> Profundidade:

**Ensaio CBR**  
**RESULTADOS**

MOLDE N.º		13	35		
MOLDAGEM	W (%)	10.9	10.9		
	$\gamma_d$ (g/cm³)	1.834	1.918		
SATURAÇÃO	W (%)	12.1	11.2		
	$\gamma_d$ (g/cm³)	1.822	1.923		
EXPANSIBILIDADE (%)		—	—		
CBR (%)	2.5 mm	17.6	19.5		
	5.0 mm	19.4	26.8		



A.1.4 – ENSAIO DE PROCTOR

 <p>Geotecnia e Mecânica de Solos</p>	Entidade: PETOP EN 304 Obra: VARIANTE SETE IRISD Processo: 060/156/88	Sondagem: T <sub>2</sub> 8/EP Amostra: 88602 Profundidade:
	Laboratório	

## Curva de Compactação (PROCTOR)

Ensaio    Proctor    Normal ☐  
    Modificado ☐

Molde    Grande ☐  
                  Pequeno ☐

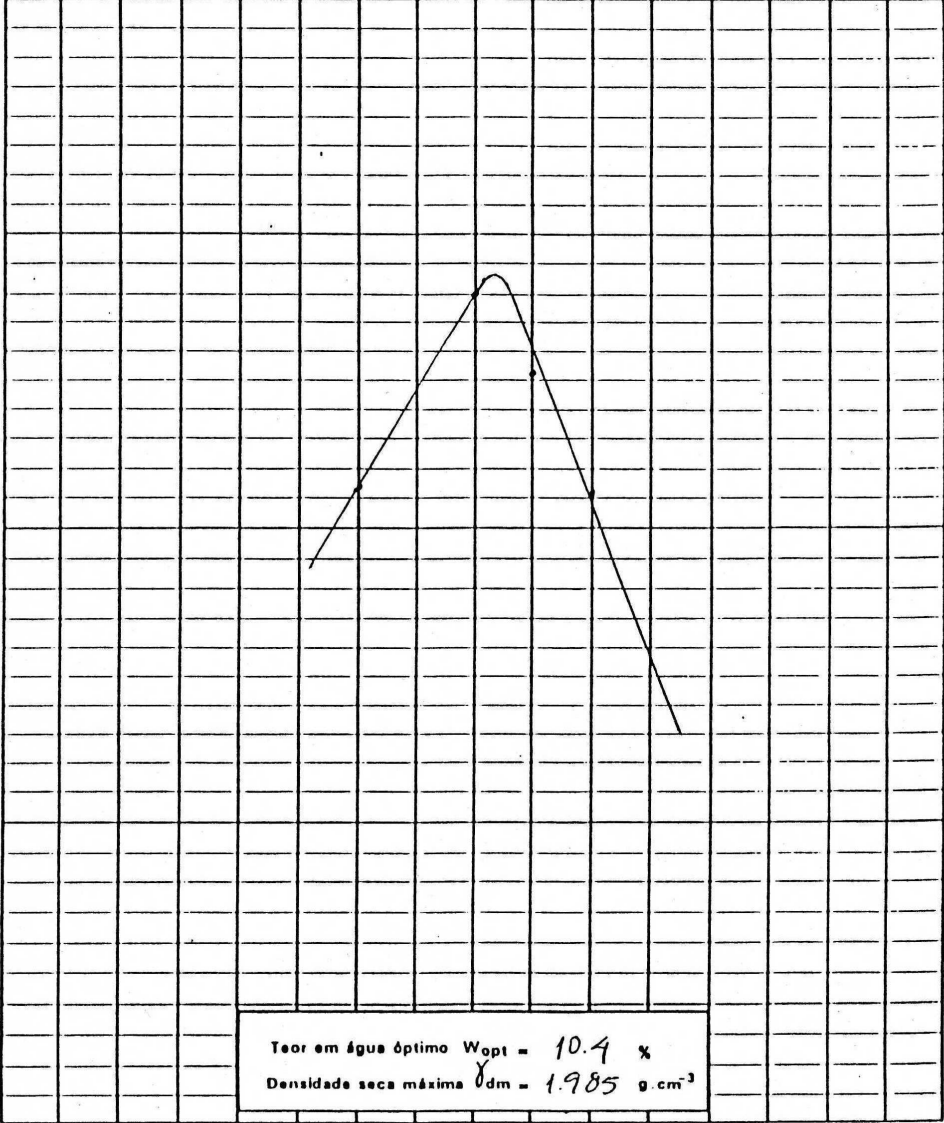
Teor em água natural,  $W_n$  =    %

Peso específico das partículas,  $G_s$  =    g cm<sup>-3</sup>

☐ Moldagem para CBR

Peso específico aparente seco,  $\gamma_d$  (g./cm<sup>3</sup>)

1.9



Teor em água ótimo  $W_{opt}$  = 10.4 %  
 Densidade seca máxima  $\gamma_{dm}$  = 1.985 g.cm<sup>-3</sup>

7      9      11      13

Teor em água,  $W$  (%)

## **A.2 – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO**

## A.2.1. – QUADRO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS SEGUNDO A ESPECIFICAÇÃO LNEC E 240-1970

## CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

Tipos dos solos	Materiais granulares [35 % ou menos passando no peneiro de 0,074 mm (n.º 200) ASTM]						Materiais silto-argilosos [mais de 35 % passando no peneiro de 0,074 mm (n.º 200) ASTM]			
	A-1		A-3		A-2		A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b			A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7		
Grupos e subgrupos										
Granulometria — % passando nos peneiros ASTM:										
2,00 mm (n.º 10) ... ..	50 máx	—	—	—	—	—	—	—	—	—
420 mm (n.º 40) ... ..	30 máx	50 máx	51 mín	—	—	—	—	—	—	—
0,074 mm (n.º 200) ... ..	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín
Características da fracção passando no peneiro de 0,420 mm (n.º 40) ASTM:										
Limite de liquidez ... ..	—	—	—	40 máx	41 mín	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín <sup>(1)</sup>
Índice de plasticidade ... ..	6 máx	—	não plástico	10 máx	10 máx	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Índice de grupo <sup>(*)</sup>	0	0	0	0	0	4 máx	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipos usuais dos constituintes significativos dos materiais	cal, ou, seixo e areia	areia fina	seixo e areia siltosos ou argilosos	solos siltosos	solos argilosos					
Comportamento na camada sob o pavimento	excelente a bom			regular a muito mau						

(<sup>1</sup>) O índice de plasticidade do subgrupo A-7.5 é igual ou menor que o limite de liquidez menos 30.

O índice de plasticidade do subgrupo A-7.6 é maior que o limite de liquidez menos 30.

(\*) O índice de grupo indica-se entre parêntesis e, pois do símbolo do grupo ou subgrupo. Exemplos: A-3 (0); A-2.7 (3); A-7.5 (10)

## **A.3 – PROGRAMA DE CÁLCULO ALIZÉ**

A.3.1. – RESULTADOS DO PROGRAMA DE CÁLCULO ALIZÉ

A SOUS UNE ROUE SIMPLE  
B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE  
C AU CENTRE DU JUMELAGE  
A= 12.500 D= 37.500 Q= 6.620  
NOMBRE DE COUCHES 4

```

*****
      *      *      *      *      *      *
* Z *      * EPSILON T * SIGMA T * EPSILON Z * SIGMA Z *
*****
* 0.00*      * 0.182E-03B* 0.102E+02B* 0.118E-03A* 0.662E+01A*
      *      * E= 56000. *      *      *      *
      *      * NU=0.00 *      *      *      *
      *      * H1= 6.00 *      *      *      *
* 6.00*      * 0.480E-04C* 0.269E+01C* 0.953E-04B* 0.534E+01B*
      *-----* COLLE---*-----*-----*-----*
* 6.00*      * 0.480E-04C* 0.231E+01C* 0.111E-03B* 0.534E+01B*
      *      * E= 48000. *      *      *      *
      *      * NU=0.00 *      *      *      *
      *      * H2= 11.00 *      *      *      *
* 17.00*      * -0.139E-03B* -0.665E+01B* 0.251E-04B* 0.121E+01B*
      *-----* COLLE---*-----*-----*-----*
* 17.00*      * -0.139E-03B* -0.338E+00B* 0.494E-03B* 0.121E+01B*
      *      * E= 2440. *      *      *      *
      *      * NU=0.00 *      *      *      *
      *      * H3= 20.00 *      *      *      *
* 37.00*      * -0.930E-04C* -0.227E+00C* 0.241E-03C* 0.588E+00C*
      *-----* COLLE---*-----*-----*-----*
* 37.00*      * -0.930E-04C* -0.162E+00C* 0.338E-03C* 0.588E+00C*
      *      * E= 1740. *      *      *      *
      *      * NU=0.00 *      *      *      *
      *      * H4=INFINI *      *      *      *
      *      *      *      *      *      *
*****
      * D *      29.62MM/100      * R*D      *
      * R *      408.77M      *      12106.52M*MM/100      *
*****
MODULES ET CONTRAINTES EN BARS

```